



Pêches et Océans
Canada
Sciences

Fisheries and Oceans
Canada
Science

Secrétariat canadien de consultation scientifique (SCCS)

Document de recherche 2014/076

Région du Québec

Modélisation de la croissance en longueur du maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) par une approche statistique bayésienne

François Grégoire et Linda Girard

Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, Route de la Mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

Avant-propos

La présente série documente les fondements scientifiques des évaluations des ressources et des écosystèmes aquatiques du Canada. Elle traite des problèmes courants selon les échéanciers dictés. Les documents qu'elle contient ne doivent pas être considérés comme des énoncés définitifs sur les sujets traités, mais plutôt comme des rapports d'étape sur les études en cours.

Les documents de recherche sont publiés dans la langue officielle utilisée dans le manuscrit envoyé au Secrétariat.

Publié par :

Pêches et Océans Canada
Secrétariat canadien de consultation scientifique
200, rue Kent
Ottawa (Ontario) K1A 0E6
<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/>
csas-sccs@dfo-mpo.gc.ca



© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2014
ISSN 2292-4272

La présente publication doit être citée comme suit :

Grégoire, F. et Girard, L. 2014. Modélisation de la croissance en longueur du maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) par une approche statistique bayésienne. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2014/076. v + 41 p.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUCTION.....	1
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	1
2.1. SOURCE DES DONNÉES ET ANALYSES PRÉLIMINAIRES	1
2.2. TRAITEMENT DES DONNÉES	1
2.2.1. Calcul des paramètres du modèle de croissance de von Bertalanffy	1
2.2.2. Calcul des intervalles de prédictibilité	2
2.2.3. Calcul des intervalles de crédibilité	2
3. RÉSULTATS.....	3
3.1. RELATIONS ANNUELLES	3
3.1.1. Statistiques descriptives	3
3.1.2. Paramètres de croissance	3
3.1.3. Intervalles de prédictibilité.....	3
3.1.4. Distributions postérieures et intervalles de crédibilité	3
3.2. RELATIONS PAR COHORTE	4
3.2.1. Statistiques descriptives	4
3.2.2. Paramètres de croissance et intervalles de prédictibilité	4
3.2.3. Distributions postérieures et intervalles de crédibilité	4
4. CONCLUSION	4
5. REMERCIEMENTS.....	5
6. RÉFÉRENCES.....	5
TABLEAUX.....	7
FIGURES.....	21
ANNEXE.....	40

RÉSUMÉ

La croissance en longueur du maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) du golfe du Saint-Laurent a été modélisée à l'aide des approches statistiques bayésienne et classique. Les résultats ont mis en lumière plusieurs avantages liés à l'approche bayésienne. De tels avantages devraient inciter à une plus grande utilisation de cette approche en dynamique de population.

Modeling the growth in length of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus* L.) by a Bayesian statistical approach

ABSTRACT

Growth in length of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus* L.) in the Gulf of St. Lawrence was modeled using Bayesian and classic statistical approaches. The results highlighted several advantages linked to the Bayesian approach. Such advantages should encourage greater use of this approach in population dynamic.

1. INTRODUCTION

La croissance est un paramètre important du cycle de vie des poissons (Guy et Brown 2007). En absence d'émigration et d'immigration elle est responsable, comme le recrutement, des variations d'abondance d'un stock (Haddon 2011). Au cours des ans, le rôle de la croissance a fait l'objet de plusieurs études portant notamment sur la mortalité (Mosegaard *et al.* 2002) et, récemment, sur la réponse des espèces aux changements climatiques (Haddon 2011). Il existe plusieurs modèles décrivant la croissance des poissons (Jobling 2002). Pour les espèces marines exploitées commercialement, le modèle de von Bertalanffy est celui qui a été le plus utilisé en raison de son application dans les équations de rendement de Beverton–Holt (King 2007).

Historiquement, les paramètres du modèle de croissance de von Bertalanffy étaient estimés graphiquement (Ricker 1980). Dans la présente étude, ils ont été estimés pour le maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) du golfe du Saint-Laurent à l'aide d'une approche statistique bayésienne. Depuis quelques années, cette approche connaît un intérêt marqué compte tenu de ses nombreux avantages par rapport aux statistiques classiques (Kéry 2010).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. SOURCE DES DONNÉES ET ANALYSES PRÉLIMINAIRES

Les données de longueur et d'âge utilisées dans cette étude proviennent d'échantillons commerciaux qui ont été récoltés sur la côte est du Canada entre 1973 et 2013. Ces échantillons ont été recueillis dans différents ports de débarquements localisés principalement dans le sud du golfe du Saint-Laurent et sur la côte ouest de Terre-Neuve. Les échantillons proviennent des pêches aux filets maillants, à la trappe, à la ligne et à la senne bourse (Grégoire *et al.* 2013). Les poissons dont des données biologiques (longueur, poids, maturité, etc.) étaient manquantes ont été exclus des analyses tout comme ceux dont l'âge n'a pu être déterminé.

2.2. TRAITEMENT DES DONNÉES

2.2.1. Calcul des paramètres du modèle de croissance de von Bertalanffy

La croissance du maquereau du golfe du Saint-Laurent a été décrite à l'aide du modèle développé par von Bertalanffy (1938). Ce modèle, basé sur des considérations physiologiques, est défini de la façon suivante (Ricker 1980) :

$$L_t = L_{inf} (1 - e^{-k(t-t_0)})$$

où L_t , L_{inf} , k et t_0 représentent respectivement la longueur à l'âge t , la longueur théorique maximale (asymptotique), le paramètre de Brody qui décrit la courbure de la trajectoire de croissance et l'âge théorique pour lequel la longueur est 0. L_{inf} représente la longueur moyenne des poissons les plus âgés en supposant qu'ils aient une croissance infinie et k la vitesse à laquelle un poisson atteint L_{inf} . Quant à t_0 , ce paramètre n'a pas réellement de signification biologique. Le modèle de croissance de von Bertalanffy peut être employé avec des données intégrant plusieurs cohortes ou une seule lors de son suivi annuel (Guy et Brown 2007).

Les paramètres des modèles de croissance des maquereaux échantillonnés en 2011 ont d'abord été calculés à l'aide de la procédure non linéaire NLIN de SAS (version 9.3) (SAS Institute Inc. 2011) pour les femelles et les mâles séparés puis pour toutes les données

regroupées. La procédure NLIN détermine des erreurs-types et des intervalles de confiance approximatifs. Dans un second temps, les paramètres de croissance de ces mêmes poissons ont été calculés à l'aide d'une approche statistique bayésienne et comparés aux résultats de la procédure NLIN. Suite à la similitude des résultats, l'approche statistique bayésienne a été appliquée sur les données annuelles de la période 1973–2013 et pour les cohortes qui sont apparues entre 1973 et 2005. Dans ce dernier cas, le choix s'est porté sur les cohortes ayant un âge maximal supérieur ou égal à huit ans puisque pour le maquereau le plateau associé au modèle de croissance de von Bertalanffy n'est pas réellement atteint avant cet âge.

Dans sa forme la plus simple, l'approche statistique bayésienne peut être décrite de la façon suivante (Cowles 2013):

$$P(\text{Modèle} \mid \text{Données}) \propto P(\text{Données} \mid \text{Modèle}) \times P(\text{Modèle})$$

où la probabilité postérieure des résultats d'un modèle est proportionnelle au produit d'une fonction de vraisemblance par la distribution des paramètres du modèle. L'approche statistique bayésienne utilise les lois de probabilité pour combiner les informations reliées aux paramètres d'un modèle. Ces informations sont contenues dans les données observées et quantifiées par une fonction de vraisemblance en tenant compte de ce qui est connu ou assumé ("*prior*") des paramètres avant que ces données ne soient récoltées ou analysées (Kéry 2010).

Les paramètres de croissance ont été calculés à l'aide du logiciel OpenBUGS. OpenBUGS est une version gratuite de BUGS (Lunn *et al.* 2009) et fait suite à la version WinBUGS (Sturtz *et al.* 2005) qui n'est plus en développement. OpenBUGS a été utilisé par l'intermédiaire du langage R (version 3.0.1) (R Development Core Team 2008) et de la librairie R2OpenBUGS. Les modèles de croissance ont été associés à une fonction de vraisemblance de type normal dont l'erreur de précision (écart-type) et les "*priors*", qui sont attribués aux paramètres de croissance, étaient associés à une distribution uniforme. Les relations entre les paramètres de croissance ont été décrites à l'aide de la librairie ggplot2 (Wickham 2009). La convergence des chaînes de Markov a été vérifiée à l'aide du test de Gelman–Rubin (Gelman et Rubin 1992) et du test de stationnarité d'Heidelberger–Welch (Heidelberger et Welch 1983). Dans le premier cas, une valeur située près de l'unité signifie que la convergence a été atteinte. Le code OpenBUGS utilisé pour déterminer les paramètres de croissance est présenté à l'Annexe 1.

2.2.2. Calcul des intervalles de prédictibilité

Les modèles de croissance des femelles et des mâles échantillonnés en 2011 ont été comparés sur la base de leurs intervalles de prédictibilité. Pour construire de tels intervalles, les paramètres de croissance ont été tirés aléatoirement ($n=10\,000$) de leurs distributions postérieures. À partir des résultats, de nouvelles longueurs ont été attribuées à chaque groupe d'âge. Par définition, les intervalles de prédictibilité à 95 % sont associés aux longueurs comprises entre les quantiles 2,5 % et 97,5 %. Ces intervalles ont été calculés pour tous les modèles annuels et par cohorte.

2.2.3. Calcul des intervalles de crédibilité

L'approche statistique bayésienne produit des distributions de valeurs des paramètres à estimer et non pas des estimations ponctuelles comme dans le cas des statistiques classiques. Ces distributions sont utilisées pour définir des intervalles de crédibilité qui correspondent aux valeurs comprises entre les quantiles 2,5 % et 97,5 %. Les distributions postérieures des paramètres des modèles de croissance et les intervalles de crédibilité ont été définis pour tous les modèles annuels et par cohorte.

3. RÉSULTATS

3.1. RELATIONS ANNUELLES

3.1.1. Statistiques descriptives

De 1 072 à 4 371 maquereaux ont été analysés annuellement (Tableau 1). Les âges minimal et maximal ont été respectivement de 0 et 18 ans pour des moyennes annuelles variant de 2,6 à 6,0 ans. Les longueurs minimale et maximale ont été de 160 et 467 mm (Tableau 2) avec des longueurs moyennes annuelles variant de 308,1 à 371,3 mm. Au cours de la période 1973–2013, les âges et les longueurs moyens ont présenté une nette tendance à la baisse.

3.1.2. Paramètres de croissance

Selon la procédure NLIN de SAS, les paramètres L_{inf} , k et t_0 des maquereaux échantillonnés en 2011 ont été estimés à 408,1 mm, 0,247 et -3,405 (Tableau 3A). Des valeurs légèrement plus élevées ont été obtenues pour les femelles par rapport aux mâles. Des valeurs et des tendances similaires ont été produites par l'approche statistique bayésienne (Tableau 3B). Le tracé des chaînes associé à cette approche indique que la convergence a été atteinte avec des distributions postérieures des paramètres de croissance caractérisées par la présence d'un mode principal (Figure 1). Les paramètres de croissance se sont avérés fortement corrélés entre eux. Une relation inverse caractérise les paramètres L_{inf} et k ($r = -0,96$) (Figure 2A) et t_0 et L_{inf} ($r = -0,87$) (Figure 2B) et une relation positive les paramètres t_0 et k ($r = 0,97$) (Figure 2C).

Selon les résultats des tests de Gelman–Rubin, la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) a convergé pour tous les paramètres de croissance des modèles annuels (femelles et mâles regroupés ensemble) de la période 1973–2013 (Tableau 4). La convergence a aussi été atteinte selon les tests de stationnarité d'Heidelberger–Welch (indiqué sur les sorties d'OpenBUGS par test="passed"). Les paramètres moyens, les écarts-types et les intervalles de crédibilité associés à ces modèles sont présentés au Tableau 5.

3.1.3. Intervalles de prédictibilité

À partir de trois ans, les longueurs à l'âge prédites par le modèle de croissance des femelles deviennent plus élevées que celles des mâles (Figure 3A). Cependant, les intervalles de prédictibilité se chevauchent pour les âges couverts par les deux modèles (Figure 3B) ce qui signifie que ces derniers produisent des résultats non significativement différents. Les intervalles de prédictibilité sont présentés à la Figure 3C pour le modèle de la saison 2011 et à la Figure 4 pour les autres modèles annuels.

3.1.4. Distributions postérieures et intervalles de crédibilité

Les distributions des paramètres et les courbes de croissance ont grandement varié au cours des ans (Tableau 5; Figure 4). Plusieurs des distributions postérieures annuelles, de par l'absence de chevauchement, indiquent une différence significative (Figures 5A, 5B et 5C). La plupart des distributions sont unimodales, symétriques et de faibles étendues en plus de présenter des tendances annuelles. Par exemple, les distributions de L_{inf} se sont déplacées vers de plus grandes longueurs au cours des périodes 1981–1988, 1989–1994 et 1997–2000, puis vers de plus petites longueurs pour les périodes 1974–1977 et 2004–2010 (Figure 5A). Les paramètres k et t_0 s'accompagnent de déplacements opposés puisque ces derniers sont inversement reliés à L_{inf} (Figures 5B et 5C). Les plus importantes variations annuelles chez les paramètres de croissance ont été observées pour les années antérieures à 1990 (Figures 6A, 6B et 6C). Les valeurs moyennes de L_{inf} , k et t_0 pour la période 1973–2012 sont respectivement de 407,9 mm, 0,322 et -2,674.

3.2. RELATIONS PAR COHORTE

3.2.1. Statistiques descriptives

Le nombre de maquereaux par cohorte a varié de 252 (cohorte 1992) à 11 109 (cohorte 1982) (Tableau 6). Les âges ont varié de 0 à 18 ans pour des moyennes se situant entre 2,8 et 5,4 ans. Les longueurs minimale et maximale ont été respectivement de 160 et 467 mm (Tableau 7). Les longueurs moyennes par cohorte ont varié de 305,3 à 372,9 mm.

3.2.2. Paramètres de croissance et intervalles de prédictibilité

Selon les résultats des tests de Gelman–Rubin, la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) a convergé lors des estimations des paramètres de croissance des cohortes 1973–2005 (Tableau 8). La convergence a aussi été atteinte selon les tests d'Heidelberger–Welch. Les valeurs moyennes des paramètres de même que les écarts-types et les intervalles de prédictibilité de ces modèles sont présentés au Tableau 9 ainsi qu'à la Figure 7.

3.2.3. Distributions postérieures et intervalles de crédibilité

Les distributions des paramètres et les courbes de croissance ont grandement varié d'une cohorte à l'autre (Figure 8). La plupart des distributions postérieures sont unimodales, symétriques, de faibles étendues en plus de présenter des différences significatives et des tendances associées à plusieurs cohortes (Figures 8A, 8B et 8C). Par exemple, les distributions de L_{inf} des cohortes 1973–1978, 1982–1986 et 1989–1998 se sont déplacées vers de plus petites longueurs (Figure 8A) par rapport à des déplacements inverses pour les paramètres k et t_0 (Figures 8B et 8C). Les paramètres moyens des cohortes 1973–2004 sont respectivement de 408,8 mm, 0,332 et -2,558.

Les valeurs moyennes de L_{inf} présentent une tendance nette à la baisse pour les cohortes 1973 à 1987 et 1989 à 2001 (Figure 9A). Les plus importantes variations des paramètres k et t_0 ont été observées pour les cohortes antérieures à celles de 1990 (Figure 9B et 9C). Les valeurs moyennes des cohortes, qui sont apparues par la suite, se situent près de la moyenne des séries correspondantes.

4. CONCLUSION

L'approche statistique bayésienne a produit des résultats identiques à la régression non linéaire. Cependant, par rapport à cette dernière, l'approche bayésienne présente plusieurs avantages. Tout d'abord, les valeurs des paramètres d'un modèle sont présentées sous forme de distributions qui peuvent être décrites en termes de tendance centrale (mode, médiane, moyenne) et de dispersion (étendue, écart-type). Ces distributions peuvent aussi être comparées entre elles, visuellement ou à l'aide de tests statistiques. En statistique classique, un paramètre n'est décrit que par son estimation ponctuelle et des intervalles de confiance qui doivent être interprétés de la façon suivante : si ce paramètre était calculé un très grand nombre de fois, dans 95 % des cas (pour des intervalles à 95 %) sa vraie valeur se situerait à l'intérieur des intervalles de confiance produits. En statistique bayésienne, les vraies valeurs d'un paramètre se situent à l'intérieur des intervalles de crédibilité.

Un autre avantage de l'approche statistique bayésienne est la possibilité d'échantillonner à nouveau les distributions postérieures des paramètres d'un modèle afin de produire des intervalles de prédictibilité. De tels intervalles tiennent compte de toutes les incertitudes d'un modèle. Dans cette étude, les intervalles de prédictibilité ont été utilisés pour tester si les modèles de croissance des femelles et des mâles étaient significativement différents. Les intervalles de prédictibilité pourraient aussi être utilisés pour comparer différents modèles de croissance.

Il existe aussi d'autres avantages liés à l'utilisation de l'approche statistique bayésienne comme la création de variables dérivées, la possibilité de solutionner des modèles complexes dont certains ne peuvent l'être par les statistiques classiques et finalement la production de résultats non biaisés même avec des échantillons de faibles nombres (Kéry 2010; Kéry et Schaub 2012).

Les résultats de cette étude mettent aussi en lumière la présence de variations annuelles importantes chez les paramètres de croissance. Ces différences s'expliquent par l'arrivée et la présence pendant plusieurs années de cohortes dominantes ayant des caractéristiques de croissance très différentes des autres cohortes. Pour cette raison, la croissance du maquereau devrait plutôt être décrite non pas sur une base annuelle mais par cohorte ou groupes de cohortes.

Les plus importantes variations chez les paramètres de croissance ont été observées pour les données antérieures à 1990. Ces données proviennent de différents laboratoires ce qui n'exclue pas la présence d'erreurs qui se seraient produites lors de leur collecte ou saisie de même que lors de la standardisation du format des fichiers.

La présente étude représente une première quant à l'utilisation de l'approche statistique bayésienne pour le maquereau des sous-régions 3 et 4 de l'OPANO. Compte tenu des résultats obtenus et des avantages décrits précédemment, cette approche devrait être utilisée davantage en dynamique de population.

5. REMERCIEMENTS

De très sincères remerciements sont exprimés à l'égard de Denis Bernier et Jean-Louis Beaulieu pour la révision du document.

6. RÉFÉRENCES

- Cowles, M. K. 2013. Applied Bayesian statistics with R and OpenBUGS examples. Springer Texts in Statistics. Springer, New York, NY. USA. 232 pp.
- Guy, C. S. et Brown, M. L. (eds.). 2007. Analysis and interpretation of freshwater fisheries data. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. USA. 961 pp.
- Gelman, A. et Rubin, D. B. 1992. "Inference from iterative simulation using multiple sequences (with discussion)". *Statistical Science* 7:457–511.
- Grégoire, F., Beaulieu, J.-L., Gendron, M.-H. et Lévesque, I. 2013. Le maquereau bleu (*Scomber scombrus* L.) des sous-régions 3 et 4 de l'OPANO en 2011. Secr. can. de consult. sci. du MPO. Doc. de rech. 2013/049. vi + 131 p.
- Haddon, M. 2011. Modelling and quantitative methods in fisheries. 2nd ed. Chapman & Hall. New York, NY. USA. 449 pp.
- Heidelberger, P. et Welch, P. D. 1983. "Simulation run length control in the presence of an initial transient". *Operations Research* 31:1109–1144.
- Jobling, M. 2002. Environmental factors and rates of development and growth. In: P. J. B. Hart et J. D. Reynolds (eds.). *Handbook of fish biology and fisheries*, vol. 1. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 97–122.
- Kéry, M. 2010. Introduction to WinBUGS for ecologist: A Bayesian approach to regression, ANOVA, mixed models and related analyses. Academic Press, Burlington, MA. USA. 302 pp.

-
- Kéry, M. et Schaub, M. 2012. Bayesian population analysis using WinBUGS: A hierarchical perspective. Academic Press, Waltham, MA. USA. 535 pp.
- King, M. 2007. Fisheries biology, assessment and management. 2nd ed. Blackwell Publishing. Oxford, UK. 382 pp.
- Lunn, D., Spiegelhalter, D., Thomas, A. et Best, N. 2009. The BUGS project: Evolution, critique and future directions (with discussion). *Statistics in Medicine* **28**: 3049–3082.
- Mosegaard, H., Folkvord, A. et Wright, P. J. 2002. Applications écologiques. In: Manuel de sclérochronologie des poissons. Panfili, J., de Pontual, H., Troadec, H. et Wright, P. J. (éd.). Coédition Ifremer-IRD, 167–179.
- R Development Core Team. 2008. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Ricker, W. E. 1980. Calcul et interprétation des statistiques biologiques des populations de poissons. Bull. Fish. Res. Board Can. 191F: 409 pp.
- SAS Institute Inc. 2011. SAS/Stat® 9.3 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc. 8621 pp.
- Sturtz, S., Ligges, U. et Gelman, A. 2005. R2WinBUGS: A Package for Running WinBUGS from R. *Journal of Statistical Software* 12(3): 1–16.
- Von Bertalanffy, L. 1938. A quantitative theory of organic growth. *Human Biology* 10: 181–213.
- Wickham, H. 2009. ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer User R!. Springer, New York, NY. USA. 212 pp.

TABLEAUX

Tableau 1. Statistiques descriptives annuelles de l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

ANNÉE	AGE (année)				
	N	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	É.-T.
1973	2 562	1	5.6	16	2.3
1974	1 247	1	4.9	17	2.4
1975	1 836	1	4.1	16	2.2
1976	2 965	1	3.8	14	2.3
1977	3 257	1	3.6	15	2.2
1978	1 940	1	4.3	18	2.2
1979	2 834	1	5.2	16	2.1
1980	1 864	1	5.2	15	2.3
1981	1 635	1	5.4	15	2.3
1982	1 441	1	4.9	15	2.9
1983	1 663	1	5.3	16	3.1
1984	3 974	1	4.1	17	3.0
1985	3 279	1	4.0	16	2.3
1986	2 851	1	4.3	13	1.7
1987	2 272	1	4.6	14	1.8
1988	1 974	1	5.9	14	1.7
1989	2 609	1	4.9	16	2.5
1990	1 879	1	5.4	15	2.6
1991	1 762	1	5.9	15	2.8
1992	1 991	1	5.6	18	3.0
1993	2 383	1	6.0	15	2.9
1994	1 460	1	5.5	14	2.8
1995	2 316	1	4.7	13	2.6
1996	1 587	1	4.8	15	2.7
1997	1 708	1	4.2	15	2.7
1998	1 764	1	4.5	16	2.5
1999	1 294	1	3.8	13	2.0
2000	1 637	1	3.6	14	2.1
2001	2 235	0	3.2	13	1.7
2002	1 835	1	3.6	12	1.5
2003	2 454	1	3.4	9	1.5
2004	2 459	1	3.5	9	1.8
2005	2 536	1	3.6	11	1.9
2006	4 317	0	3.3	9	1.8
2007	3 233	0	3.5	10	1.6
2008	2 432	0	3.1	10	1.6
2009	3 144	0	2.7	10	1.6
2010	4 371	1	3.0	11	1.4
2011	2 373	1	2.6	12	1.7
2012	1 210	0	2.6	9	1.2
2013	1 072	0	2.8	8	1.1
Min.:	1 072	0	2.6	8	1.1
Max.:	4 371	1	6.0	18	3.1

Tableau 2. Statistiques descriptives annuelles de la longueur (mm) à la fourche des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

ANNÉE	LONGUEUR (mm)				
	N	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	É.-T.
1973	2 562	162	330.1	463	35.5
1974	1 247	228	338.9	430	34.3
1975	1 836	202	332.6	452	43.0
1976	2 965	217	326.5	430	37.7
1977	3 257	190	316.2	432	48.6
1978	1 940	162	336.5	461	41.5
1979	2 834	217	351.1	441	34.4
1980	1 864	237	356.1	448	28.4
1981	1 635	182	371.3	441	28.5
1982	1 441	160	360.1	434	50.5
1983	1 663	218	370.3	440	39.7
1984	3 974	214	344.7	442	41.7
1985	3 279	219	340.7	440	36.7
1986	2 851	238	347.1	457	27.3
1987	2 272	233	350.1	437	31.0
1988	1 974	252	371.1	442	24.7
1989	2 609	209	351.7	462	42.5
1990	1 879	247	362.8	467	36.9
1991	1 762	257	368.5	458	35.4
1992	1 991	230	356.3	440	37.6
1993	2 383	244	357.0	454	32.9
1994	1 460	228	354.6	442	32.3
1995	2 316	203	344.0	436	37.3
1996	1 587	229	347.2	435	38.9
1997	1 708	169	339.4	427	42.2
1998	1 764	216	349.5	428	38.0
1999	1 294	225	335.8	419	37.9
2000	1 637	195	330.8	430	43.6
2001	2 235	192	322.4	422	37.8
2002	1 835	210	328.8	418	33.7
2003	2 454	196	323.8	415	34.1
2004	2 459	200	321.5	420	40.2
2005	2 536	188	318.7	406	40.0
2006	4 317	198	319.1	405	35.6
2007	3 233	190	326.1	407	30.5
2008	2 432	187	318.2	428	33.8
2009	3 144	170	308.1	421	38.0
2010	4 371	220	325.7	401	25.7
2011	2 373	224	309.2	407	37.6
2012	1 210	191	319.6	404	33.9
2013	1 072	160	317.4	400	38.1
Min.:	1 072	160	308.1	400	24.7
Max.:	4 371	257	371.3	467	50.5

Tableau 3. Paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge calculés par la procédure NLIN de SAS (A) et par une approche statistique bayésienne à l'aide d'OpenBUGS (B) pour les maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada en 2011.

(A)	SEXE	Paramètres	NLIN (SAS)			
			Estimation	Erreur standard approximatif	Intervalles de confiance (95%) approximatifs	
					Inférieur	Supérieur
						Étendue (valeur absolue)
Femelle + Mâle		L_{∞}	408.1	4.354	399.6	416.7
		k	0.247	0.012	0.223	0.271
		t_0	-3.405	0.147	-3.694	-3.117
Femelle		L_{∞}	408.9	5.789	397.5	420.3
		k	0.253	0.017	0.220	0.287
		t_0	-3.272	0.194	-3.652	-2.892
Mâle		L_{∞}	406.4	6.490	393.7	419.1
		k	0.242	0.018	0.206	0.277
		t_0	-3.536	0.224	-3.975	-3.097

(B)	SEXE	Paramètres	BAYÉSIEN (OpenBUGS)			
			Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
						Étendue (valeur absolue)
Femelle + Mâle		L_{∞}	407.2	3.763	399.5	414.6
		k	0.250	0.011	0.230	0.274
		t_0	-3.372	0.126	-3.615	-3.111
Femelle		L_{∞}	407.7	5.848	397.3	421.5
		k	0.258	0.017	0.219	0.290
		t_0	-3.233	0.194	-3.696	-2.866
Mâle		L_{∞}	407.5	7.411	394.6	423.0
		k	0.240	0.020	0.203	0.279
		t_0	-3.574	0.252	-4.070	-3.119

Tableau 4. Tests de Gelman–Rubin mesurant la convergence de la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) des paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

ANNÉE	L_{inf}		k		t_0	
	Estimation	Intervalle de confiance supérieur	Estimation	Intervalle de confiance supérieur	Estimation	Intervalle de confiance supérieur
1973	1.06	1.19	1.07	1.22	1.07	1.20
1974	1.02	1.02	1.02	1.04	1.02	1.03
1975	1.01	1.04	1.02	1.06	1.02	1.05
1976	1.01	1.02	1.01	1.02	1.01	1.02
1977	1.02	1.05	1.02	1.06	1.02	1.05
1978	1.01	1.02	1.01	1.03	1.01	1.03
1979	1.02	1.06	1.02	1.07	1.02	1.07
1980	1.16	1.48	1.16	1.49	1.16	1.49
1981	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01
1982	1.01	1.03	1.02	1.07	1.02	1.07
1983	1.01	1.02	1.01	1.03	1.01	1.03
1984	1.02	1.06	1.04	1.13	1.04	1.13
1985	1.01	1.01	1.01	1.03	1.01	1.03
1986	1.05	1.13	1.07	1.15	1.06	1.13
1987	1.17	1.50	1.20	1.56	1.19	1.54
1988	1.13	1.34	1.17	1.47	1.14	1.38
1989	1.01	1.04	1.02	1.06	1.02	1.06
1990	1.02	1.08	1.03	1.11	1.03	1.11
1991	1.01	1.03	1.02	1.03	1.02	1.03
1992	1.01	1.04	1.02	1.06	1.02	1.05
1993	1.01	1.03	1.01	1.03	1.01	1.03
1994	1.09	1.28	1.11	1.33	1.11	1.33
1995	1.01	1.03	1.01	1.03	1.01	1.03
1996	1.01	1.04	1.02	1.05	1.02	1.05
1997	1.01	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
1998	1.01	1.04	1.02	1.06	1.02	1.06
1999	1.01	1.03	1.01	1.04	1.01	1.04
2000	1.01	1.03	1.01	1.03	1.01	1.03
2001	1.04	1.14	1.05	1.16	1.05	1.16
2002	1.21	1.66	1.21	1.65	1.23	1.72
2003	1.81	2.95	1.74	2.78	1.81	2.84
2004	1.07	1.21	1.07	1.22	1.08	1.24
2005	1.02	1.05	1.02	1.05	1.01	1.04
2006	1.01	1.04	1.02	1.05	1.02	1.05
2007	1.03	1.07	1.04	1.11	1.04	1.11
2008	1.01	1.02	1.01	1.03	1.01	1.02
2009	1.03	1.07	1.04	1.09	1.04	1.08
2010	1.08	1.26	1.10	1.32	1.10	1.30
2011	1.11	1.30	1.13	1.37	1.11	1.32
2012	1.04	1.12	1.04	1.12	1.04	1.11
2013	1.04	1.14	1.05	1.16	1.04	1.14

Tableau 5. Paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge calculés par une approche statistique bayésienne à l'aide d'OpenBUGS des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

ANNÉE	Paramètres	BAYÉSIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
1973	L_{inf}	385.4	2.139	381.2	389.6
	k	0.275	0.011	0.255	0.297
	t_0	-2.138	0.142	-2.415	-1.857
1974	L_{inf}	410.3	4.020	402.9	418.7
	k	0.218	0.014	0.192	0.245
	t_0	-3.625	0.275	-4.200	-3.112
1975	L_{inf}	405.8	2.164	401.9	410.4
	k	0.296	0.010	0.276	0.314
	t_0	-2.346	0.098	-2.554	-2.165
1976	L_{inf}	396.5	1.520	393.6	399.5
	k	0.302	0.008	0.286	0.318
	t_0	-2.545	0.090	-2.719	-2.369
1977	L_{inf}	386.4	0.923	384.6	388.2
	k	0.443	0.007	0.430	0.456
	t_0	-1.044	0.030	-1.102	-0.984
1978	L_{inf}	388.4	1.448	385.6	391.3
	k	0.425	0.011	0.403	0.448
	t_0	-1.138	0.062	-1.270	-1.019
1979	L_{inf}	396.9	1.293	394.3	399.3
	k	0.323	0.008	0.309	0.340
	t_0	-2.142	0.077	-2.287	-1.987
1980	L_{inf}	423.1	3.471	416.7	429.9
	k	0.177	0.010	0.160	0.196
	t_0	-5.679	0.311	-6.246	-5.103
1981	L_{inf}	390.0	0.663	388.8	391.3
	k	0.685	0.019	0.648	0.722
	t_0	-0.455	0.062	-0.585	-0.339
1982	L_{inf}	396.5	0.789	395.0	398.1
	k	0.734	0.017	0.702	0.766
	t_0	-0.263	0.343	-0.331	-0.199
1983	L_{inf}	406.2	0.713	404.8	407.6
	k	0.518	0.011	0.496	0.540
	t_0	-1.114	0.059	-1.233	-1.002

Tableau 5. (Suite).

ANNEE	Paramètres	BAYESIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
1984	L _{inf}	412.3	0.712	410.9	413.7
	k	0.422	0.007	0.409	0.436
	t ₀	-1.178	0.051	-1.278	-1.084
1985	L _{inf}	424.4	1.467	421.6	427.3
	k	0.288	0.006	0.276	0.301
	t ₀	-2.134	0.078	-2.294	-1.987
1986	L _{inf}	441.6	2.987	436.0	447.6
	k	0.188	0.006	0.176	0.201
	t ₀	-4.110	0.165	-4.320	-3.793
1987	L _{inf}	459.1	5.706	449.4	472.2
	k	0.146	0.007	0.131	0.160
	t ₀	-5.422	0.226	-5.909	-5.019
1988	L _{inf}	463.6	7.438	448.4	477.9
	k	0.127	0.010	0.112	0.150
	t ₀	-6.913	0.439	-7.715	-5.958
1989	L _{inf}	390.2	0.912	388.5	392.1
	k	0.475	0.014	0.447	0.503
	t ₀	-1.283	0.078	-1.445	-1.136
1990	L _{inf}	403.8	1.646	400.7	407.1
	k	0.353	0.017	0.320	0.388
	t ₀	-2.158	0.184	-2.534	-1.801
1991	L _{inf}	414.1	1.574	411.2	417.5
	k	0.278	0.010	0.257	0.298
	t ₀	-3.007	0.170	-3.370	-2.702
1992	L _{inf}	407.8	1.077	405.7	410.0
	k	0.292	0.006	0.279	0.304
	t ₀	-2.547	0.090	-2.730	-2.381
1993	L _{inf}	411.5	1.487	408.6	414.4
	k	0.235	0.007	0.222	0.251
	t ₀	-3.490	0.155	-3.788	-3.179
1994	L _{inf}	417.5	2.388	413.1	422.4
	k	0.197	0.008	0.181	0.212
	t ₀	-4.835	0.214	-5.284	-4.422

Tableau 5. (Suite).

ANNÉE	Paramètres	BAYÉSIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
1995	L_{inf}	401.7	1.983	398.0	405.8
	k	0.266	0.010	0.248	0.286
	t_0	-3.361	0.140	-3.647	-3.095
1996	L_{inf}	401.8	1.630	398.5	405.1
	k	0.304	0.010	0.284	0.326
	t_0	-2.721	0.124	-2.968	-2.476
1997	L_{inf}	400.5	1.337	398.1	403.4
	k	0.342	0.009	0.322	0.359
	t_0	-2.279	0.088	-2.467	-2.122
1998	L_{inf}	407.3	1.292	405.2	410.0
	k	0.343	0.009	0.326	0.359
	t_0	-1.993	0.083	-2.158	-1.843
1999	L_{inf}	410.0	2.196	405.9	414.5
	k	0.315	0.010	0.295	0.335
	t_0	-2.116	0.102	-2.322	-1.930
2000	L_{inf}	418.5	2.642	413.2	423.4
	k	0.273	0.090	0.258	0.292
	t_0	-2.632	0.094	-2.808	-2.435
2001	L_{inf}	414.9	2.665	409.9	420.2
	k	0.296	0.010	0.276	0.317
	t_0	-2.235	0.102	-2.439	-2.038
2002	L_{inf}	435.9	5.504	426.6	448.7
	k	0.220	0.012	0.194	0.242
	t_0	-3.003	0.185	-3.407	-2.692
2003	L_{inf}	467.2	13.755	443.6	493.2
	k	0.143	0.014	0.120	0.169
	t_0	-5.049	0.316	-5.627	-4.483
2004	L_{inf}	399.5	3.368	393.1	405.8
	k	0.284	0.013	0.261	0.311
	t_0	-2.697	0.130	-2.941	-2.444
2005	L_{inf}	390.1	2.122	386.0	394.3
	k	0.324	0.011	0.302	0.348
	t_0	-2.121	0.101	-2.322	-1.922

Tableau 5. (Suite).

ANNÉE	Paramètres	BAYÉSIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
2006	L_{inf}	384.3	1.514	381.4	387.3
	k	0.338	0.008	0.322	0.355
	t_0	-2.434	0.073	-2.579	-2.295
2007	L_{inf}	392.9	1.881	389.3	396.5
	k	0.308	0.009	0.290	0.326
	t_0	-2.615	0.099	-2.808	-2.426
2008	L_{inf}	390.5	2.592	385.8	395.8
	k	0.305	0.011	0.284	0.326
	t_0	-2.775	0.108	-2.990	-2.579
2009	L_{inf}	384.9	2.195	380.8	389.5
	k	0.348	0.012	0.325	0.371
	t_0	-2.359	0.086	-2.538	-2.198
2010	L_{inf}	374.1	1.312	371.7	376.7
	k	0.464	0.016	0.434	0.494
	t_0	-1.711	0.094	-1.901	-1.534
2012	L_{inf}	392.8	4.304	384.8	402.2
	k	0.370	0.021	0.328	0.412
	t_0	-2.123	0.133	-2.407	-1.880
2013	L_{inf}	408.8	5.562	398.7	420.3
	k	0.332	0.018	0.298	0.367
	t_0	-1.949	0.105	-2.158	-1.754

Tableau 6. Statistiques descriptives de l'âge des cohortes 1973–2005 (avec âge maximal supérieur ou égal à 8 ans) des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

COHORTE	ÂGE				
	N	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	É.-T.
1973	3 218	1	5.2	16	2.6
1974	5 059	1	4.9	18	2.7
1975	2 529	1	4.6	15	2.8
1976	1 368	1	3.2	15	2.6
1977	986	1	3.2	14	2.0
1978	1 689	1	4.1	15	2.1
1979	493	1	4.3	12	2.2
1980	996	1	3.5	14	1.7
1981	3 940	1	4.3	15	2.1
1982	11 109	1	5.4	16	2.7
1983	644	1	5.2	14	2.7
1984	972	1	3.9	13	2.5
1985	723	1	4.0	12	2.3
1986	861	1	4.3	14	2.3
1987	2 775	1	4.4	12	2.1
1988	3 006	1	5.3	13	2.3
1989	808	1	4.5	12	2.0
1990	1 812	1	4.6	12	2.0
1991	1 559	1	4.3	11	1.8
1992	252	1	4.1	10	1.9
1993	1 335	1	3.3	9	1.6
1994	1 670	1	3.6	11	1.7
1995	1 406	1	3.3	10	1.6
1996	1 899	1	3.7	9	1.7
1997	1 000	1	3.5	10	1.7
1998	1 370	1	3.5	10	1.5
1999	5 889	1	4.2	12	1.9
2000	754	1	3.5	9	1.7
2001	1 010	0	3.0	8	1.4
2002	2 515	1	3.0	9	1.3
2003	4 403	1	3.3	9	1.4
2004	1 919	1	2.8	8	1.2
2005	4 204	1	3.0	8	1.4
Min.:	252	0	2.8	8	1.2
Max.:	11 109	1	5.4	18	2.8

Tableau 7. Statistiques descriptives de la longueur (mm) à la fourche des cohortes 1973–2005 (avec âge maximal supérieur ou égal à 8 ans) des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

COHORTE	LONGUEUR				
	N	MINIMUM	MOYENNE	MAXIMUM	É.-T.
1973	3 218	228	349.6	453	36.2
1974	5 059	202	346.1	439	42.6
1975	2 529	217	343.7	467	50.0
1976	1 368	190	305.3	462	70.2
1977	986	162	320.1	449	52.2
1978	1 689	217	360.0	454	41.8
1979	493	237	372.9	445	30.4
1980	996	182	354.3	435	33.6
1981	3 940	160	352.0	441	34.4
1982	11 109	218	354.7	458	35.3
1983	644	214	361.2	434	31.0
1984	972	219	333.2	438	47.2
1985	723	233	341.2	427	40.7
1986	861	236	352.1	436	35.2
1987	2 775	250	348.3	428	31.5
1988	3 006	209	352.6	428	35.3
1989	808	270	350.6	430	29.6
1990	1 812	257	346.2	424	32.2
1991	1 559	230	343.2	425	34.9
1992	252	244	347.7	413	33.9
1993	1 335	228	335.9	420	32.7
1994	1 670	203	339.0	425	38.4
1995	1 406	229	333.0	420	33.4
1996	1 899	169	335.5	415	37.3
1997	1 000	216	328.1	410	35.8
1998	1 370	225	332.3	403	30.1
1999	5 889	195	333.3	428	34.1
2000	754	218	318.0	394	34.5
2001	1 010	192	316.4	395	29.3
2002	2 515	216	315.5	401	32.1
2003	4 403	200	321.1	405	33.9
2004	1 919	188	315.2	401	33.3
2005	4 204	198	317.0	407	35.6
Min.:	252	160	305.3	394	29.3
Max.:	11 109	270	372.9	467	70.2

Tableau 8. Tests de Gelman–Rubin mesurant la convergence de la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) des paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des cohortes 1973–2005 (avec âge maximal supérieur ou égal à 8 ans) des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

COHORTE	L_{∞}		k		t_0	
	Estimation	Intervalle de confiance supérieur	Estimation	Intervalle de confiance supérieur	Estimation	Intervalle de confiance supérieur
1973	1.02	1.05	1.03	1.06	1.03	1.05
1974	1.04	1.06	1.04	1.07	1.04	1.07
1975	1.02	1.07	1.03	1.08	1.02	1.08
1976	1.03	1.10	1.04	1.13	1.04	1.13
1977	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1978	1.01	1.03	1.00	1.04	1.01	1.03
1979	1.04	1.13	1.05	1.15	1.05	1.16
1980	1.01	1.04	1.02	1.06	1.02	1.05
1981	1.04	1.12	1.05	1.16	1.05	1.16
1982	1.04	1.12	1.06	1.15	1.06	1.15
1983	1.07	1.20	1.07	1.21	1.08	1.24
1984	1.01	1.02	1.02	1.03	1.02	1.02
1985	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.01
1986	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
1987	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
1988	1.02	1.07	1.03	1.08	1.02	1.07
1989	1.17	1.35	1.12	1.17	1.14	1.24
1990	1.02	1.08	1.03	1.10	1.03	1.09
1991	1.02	1.06	1.02	1.07	1.02	1.07
1992	1.04	1.11	1.04	1.11	1.04	1.11
1993	1.12	1.36	1.12	1.36	1.10	1.32
1994	1.05	1.14	1.05	1.14	1.05	1.14
1995	1.04	1.11	1.04	1.11	1.04	1.10
1996	1.01	1.05	1.01	1.05	1.01	1.05
1997	1.01	1.03	1.01	1.03	1.01	1.03
1998	1.01	1.02	1.01	1.03	1.01	1.02
1999	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.01
2000	1.03	1.07	1.04	1.09	1.03	1.07
2001	1.03	1.08	1.03	1.09	1.03	1.09
2002	1.58	2.93	1.52	2.58	1.55	2.80
2003	1.02	1.07	1.02	1.07	1.02	1.06
2004	1.04	1.13	1.04	1.13	1.03	1.11
2005	1.11	1.35	1.14	1.41	1.13	1.39

Tableau 9. Paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge calculés par une approche statistique bayésienne à l'aide d'OpenBUGS des cohortes 1973–2005 (avec âge maximal supérieur ou égal à 8 ans) des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

COHORTE	Paramètres	BAYÉSIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
1973	L_{inf}	440.8	2.451	436.3	445.9
	k	0.169	0.005	0.159	0.179
	t_0	-4.575	0.152	-4.885	-4.293
1974	L_{inf}	433.0	1.488	430.4	436.4
	k	0.207	0.004	0.198	0.215
	t_0	-3.490	0.078	-3.668	-3.351
1975	L_{inf}	433.8	1.448	431.1	436.6
	k	0.243	0.005	0.234	0.252
	t_0	-2.669	0.064	-2.797	-2.546
1976	L_{inf}	420.7	1.620	417.6	423.8
	k	0.371	0.008	0.356	0.386
	t_0	-1.112	0.037	-1.186	-1.040
1977	L_{inf}	421.6	2.846	416.0	427.2
	k	0.383	0.012	0.361	0.407
	t_0	-1.001	0.059	-1.116	-0.882
1978	L_{inf}	407.6	0.946	405.8	409.6
	k	0.514	0.010	0.495	0.533
	t_0	-0.887	0.039	-0.967	-0.810
1979	L_{inf}	418.3	2.922	412.8	424.3
	k	0.398	0.031	0.340	0.459
	t_0	-1.972	0.276	-2.557	-1.473
1980	L_{inf}	384.7	1.317	382.1	387.3
	k	0.908	0.033	0.847	0.976
	t_0	-0.029	0.053	-0.136	0.072
1981	L_{inf}	394.5	1.256	392.1	396.9
	k	0.450	0.013	0.426	0.477
	t_0	-1.335	0.080	-1.486	-1.181
1982	L_{inf}	417.2	0.970	415.4	419.1
	k	0.223	0.004	0.215	0.230
	t_0	-3.837	0.084	-4.007	-3.685
1983	L_{inf}	405.1	3.210	399.5	412.0
	k	0.298	0.026	0.248	0.349
	t_0	-3.134	0.415	-4.027	-2.427

Tableau 9. (Suite).

COHORTE	Paramètres	BAYÉSIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
1984	L _{inf}	403.6	1.756	400.2	407.1
	k	0.358	0.011	0.338	0.381
	t ₀	-1.790	0.082	-1.951	-1.628
1985	L _{inf}	398.9	2.044	394.9	403.0
	k	0.405	0.017	0.372	0.441
	t ₀	-1.569	0.115	-1.801	-1.340
1986	L _{inf}	390.6	1.431	387.9	393.5
	k	0.468	0.017	0.435	0.502
	t ₀	-1.614	0.096	-1.810	-1.429
1987	L _{inf}	391.5	1.591	388.6	394.9
	k	0.374	0.016	0.341	0.406
	t ₀	-2.191	0.157	-2.521	-1.902
1988	L _{inf}	402.9	1.633	399.7	406.2
	k	0.280	0.009	0.264	0.298
	t ₀	-2.878	0.115	-3.111	-2.651
1989	L _{inf}	438.6	8.703	425.6	462.9
	k	0.164	0.016	0.126	0.193
	t ₀	-5.634	0.520	-7.065	-4.811
1990	L _{inf}	428.1	4.325	419.5	437.0
	k	0.191	0.010	0.171	0.213
	t ₀	-4.401	0.242	-4.911	-3.920
1991	L _{inf}	420.6	3.142	414.7	426.7
	k	0.247	0.010	0.229	0.267
	t ₀	-2.955	0.139	-3.225	-2.695
1992	L _{inf}	418.0	6.575	406.8	432.9
	k	0.271	0.026	0.219	0.321
	t ₀	-2.966	0.365	-3.771	-2.350
1993	L _{inf}	423.6	4.741	415.1	433.5
	k	0.245	0.015	0.217	0.274
	t ₀	-3.416	0.211	-3.840	-3.020
1994	L _{inf}	412.5	2.850	407.3	418.2
	k	0.308	0.012	0.284	0.331
	t ₀	-2.434	0.115	-2.670	-2.233

Tableau 9. (Suite).

COHORTE	Paramètres	BAYESIEN (OpenBUGS)			
		Moyenne	Écart-type	2.5 %	97.5 %
1995	L _{inf}	402.7	2.816	397.4	408.6
	k	0.332	0.014	0.303	0.360
	t ₀	-2.342	0.124	-2.607	-2.114
1996	L _{inf}	410.7	2.892	405.3	416.5
	k	0.279	0.011	0.259	0.301
	t ₀	-2.777	0.118	-3.002	-2.550
1997	L _{inf}	407.6	4.202	399.9	416.3
	k	0.281	0.016	0.250	0.312
	t ₀	-2.656	0.174	-3.007	-2.331
1998	L _{inf}	383.9	2.362	379.5	388.7
	k	0.397	0.018	0.363	0.433
	t ₀	-1.955	0.130	-2.210	-1.713
1999	L _{inf}	398.7	1.750	395.3	402.2
	k	0.265	0.007	0.251	0.280
	t ₀	-3.065	0.096	-3.261	-2.878
2000	L _{inf}	394.1	4.165	386.4	402.5
	k	0.272	0.016	0.243	0.303
	t ₀	-2.899	0.181	-3.240	-2.556
2001	L _{inf}	377.7	3.363	372.1	385.2
	k	0.359	0.021	0.317	0.395
	t ₀	-2.337	0.163	-2.685	-2.064
2002	L _{inf}	431.8	10.965	415.7	458.6
	k	0.185	0.017	0.149	0.213
	t ₀	-4.259	0.295	-4.938	-3.811
2003	L _{inf}	390.5	2.142	386.3	394.6
	k	0.339	0.011	0.320	0.361
	t ₀	-2.090	0.081	-2.241	-1.938
2004	L _{inf}	379.0	2.789	373.7	384.7
	k	0.447	0.021	0.407	0.489
	t ₀	-1.450	0.101	-1.656	-1.265
2005	L _{inf}	397.8	3.191	391.7	404.7
	k	0.293	0.012	0.269	0.318
	t ₀	-2.686	0.109	-2.915	-2.478

FIGURES

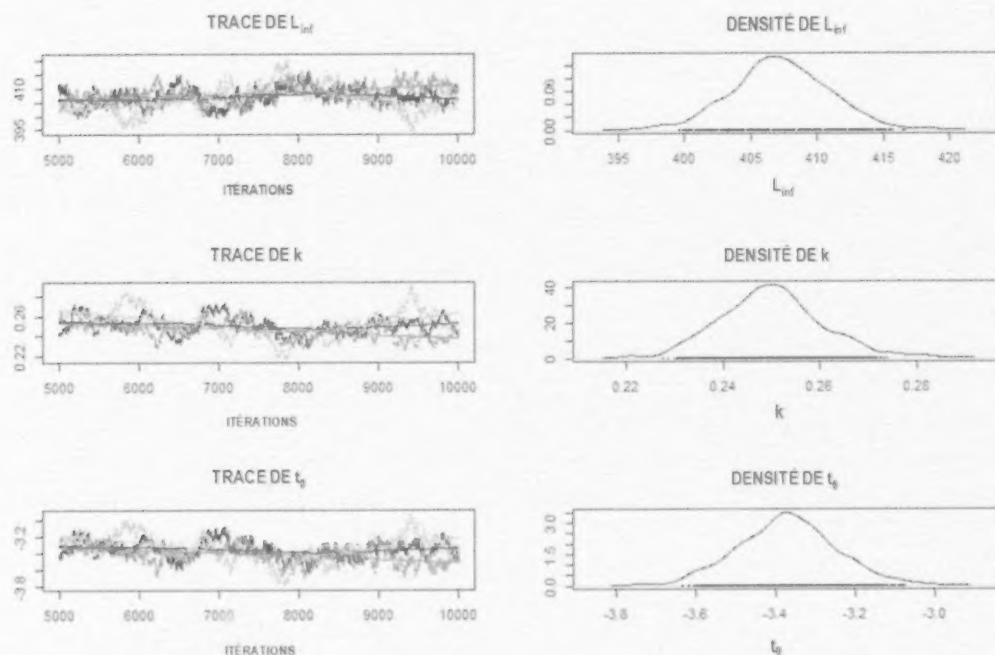


Figure 1. Tracé des chaînes de la méthode de Monte Carlo par chaîne de Markov (MCMC) et distributions postérieures des paramètres du modèle de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada en 2011.

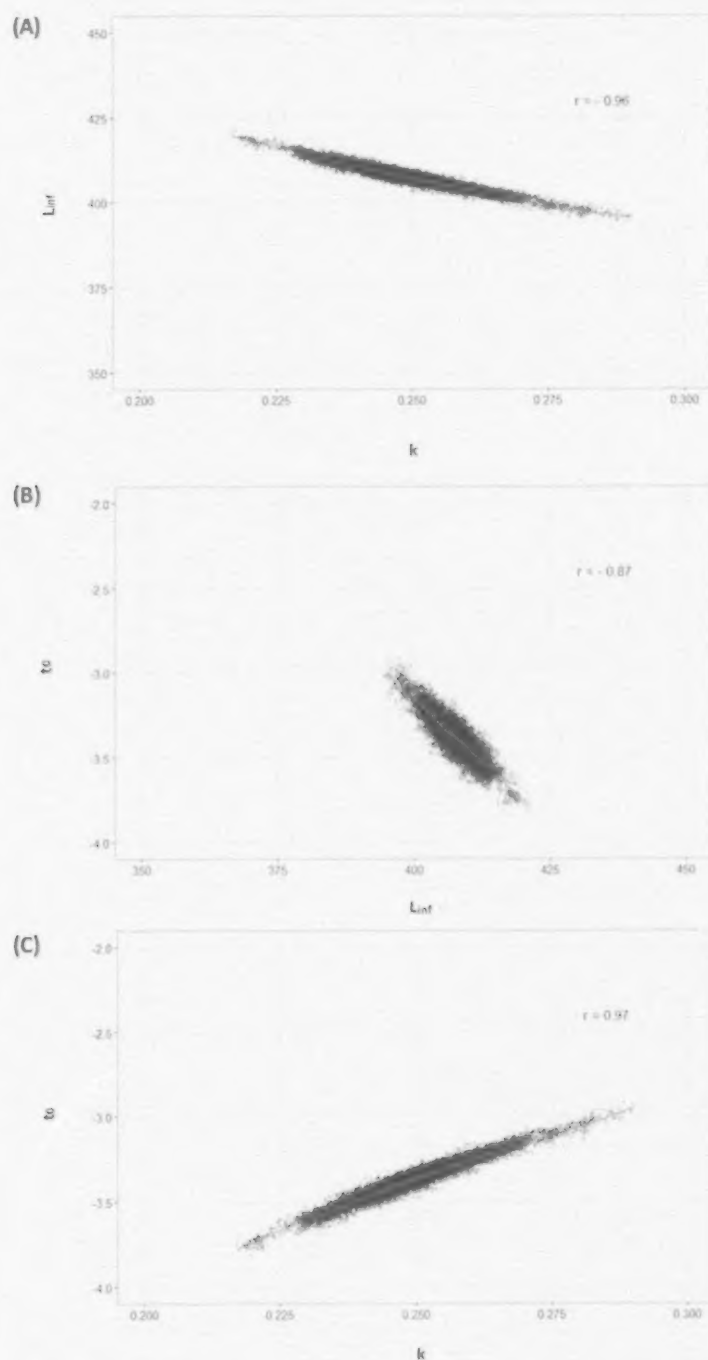


Figure 2. Relations entre les estimations postérieures des paramètres du modèle de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada en 2011 : (A) L_{inf} et k , (B) t_0 et L_{inf} et (C) t_0 et k .

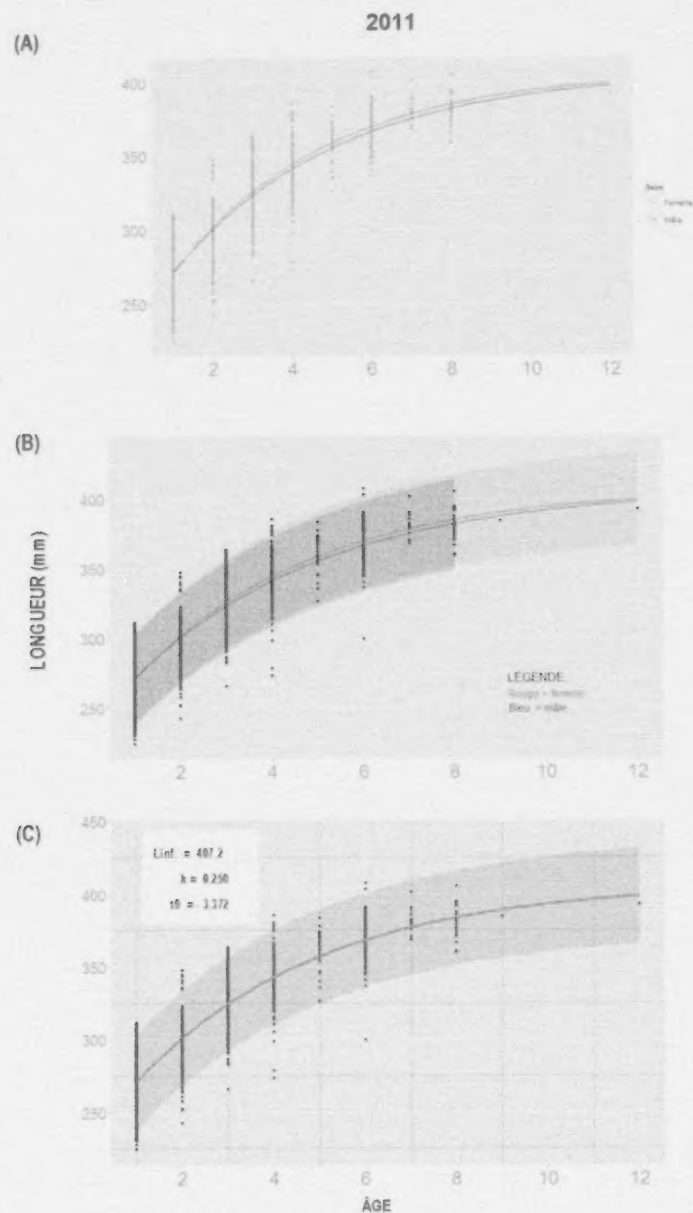


Figure 3. Longueurs (mm) à l'âge observées et prédites par le modèle de croissance de von Bertalanffy des maquereaux bleus femelles et mâles échantillonnés sur la côte est du Canada en 2011 (A), avec intervalles de prédictibilité à 95 % pour les femelles et les mâles (B) et pour les deux sexes regroupés (C).

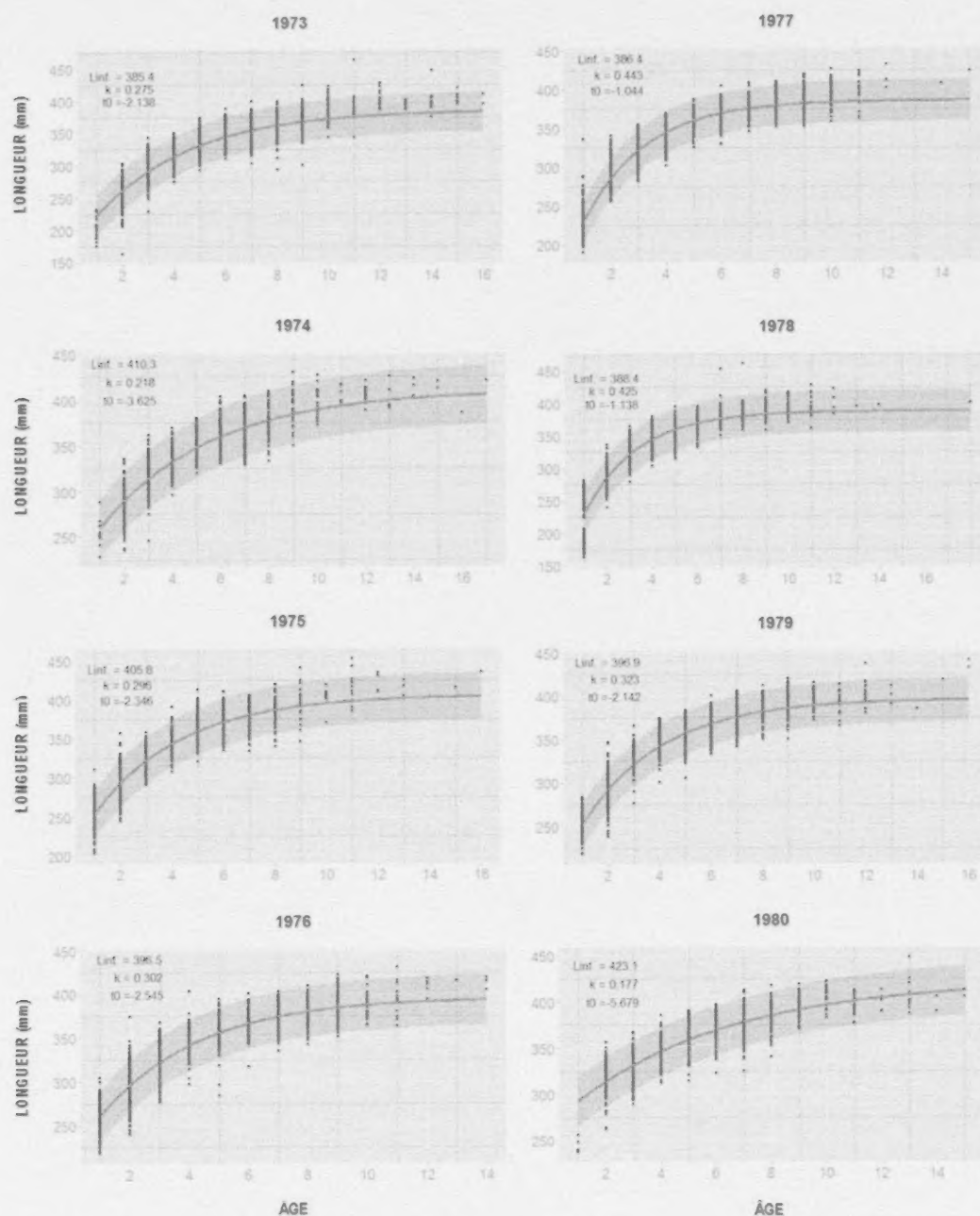


Figure 4. Longueurs (mm) à l'âge annuelles observées et prédites par les modèles de croissance de von Bertalanffy et intervalles de prédictibilité à 95 % des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

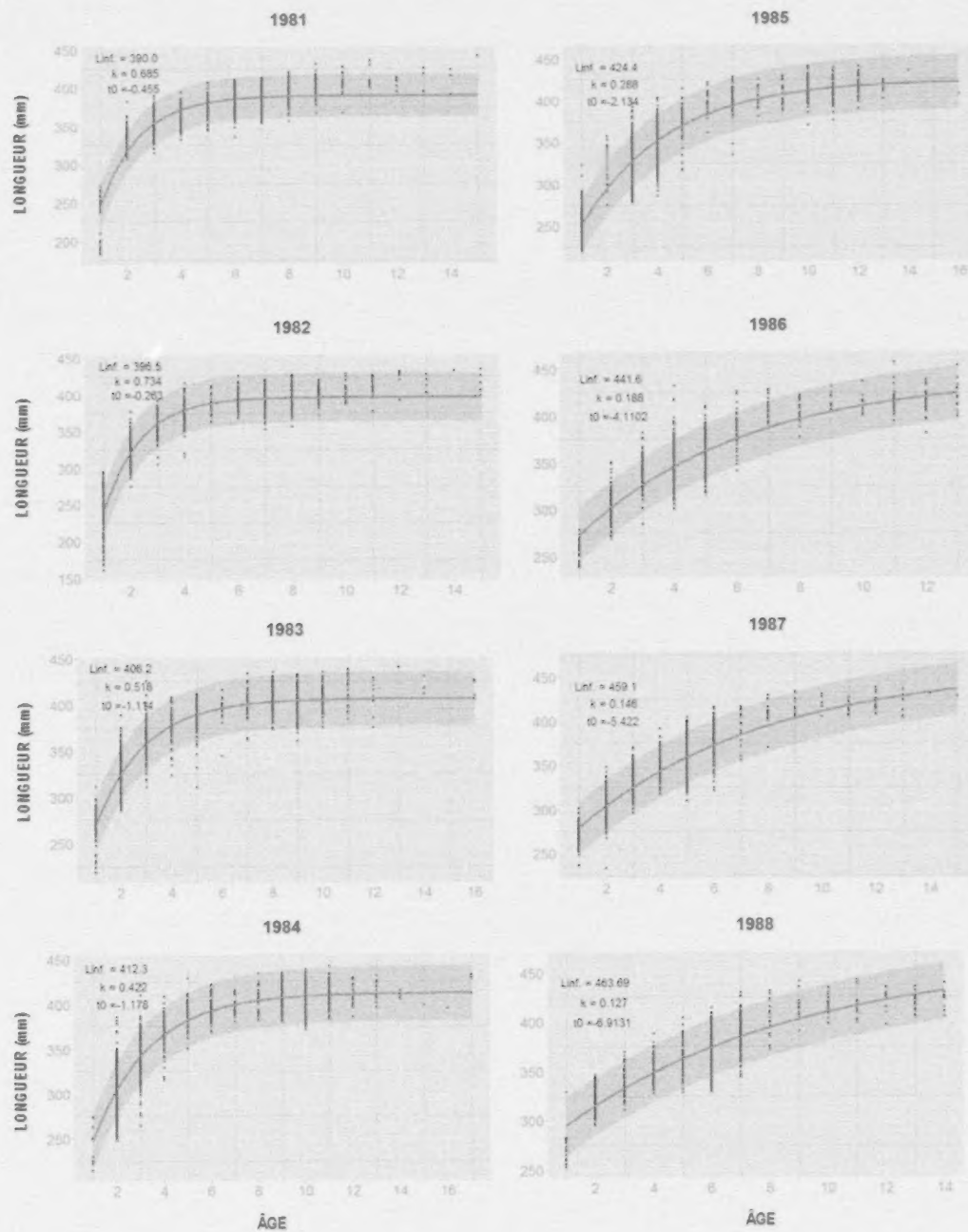


Figure 4. (Suite).

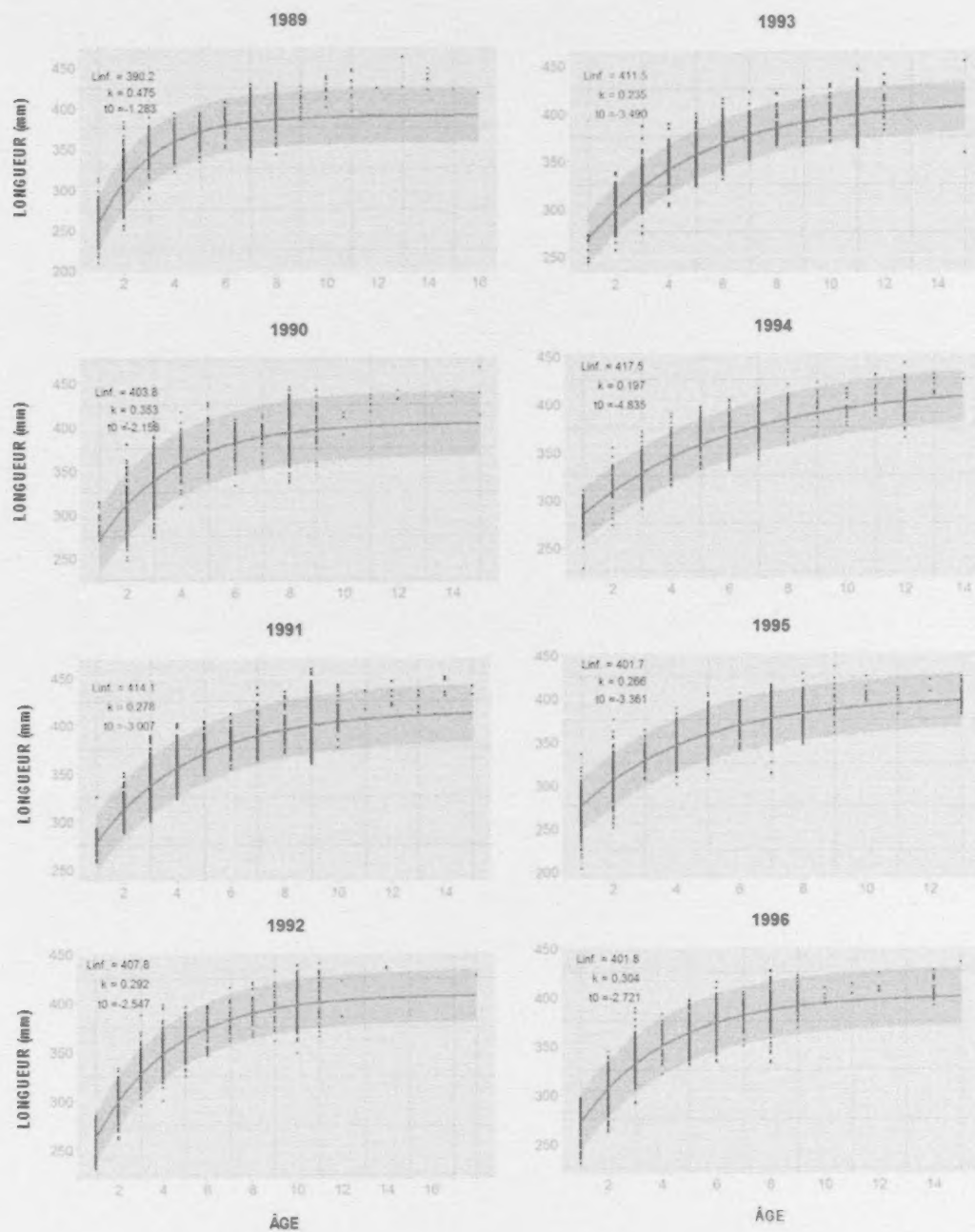


Figure 4. (Suite).

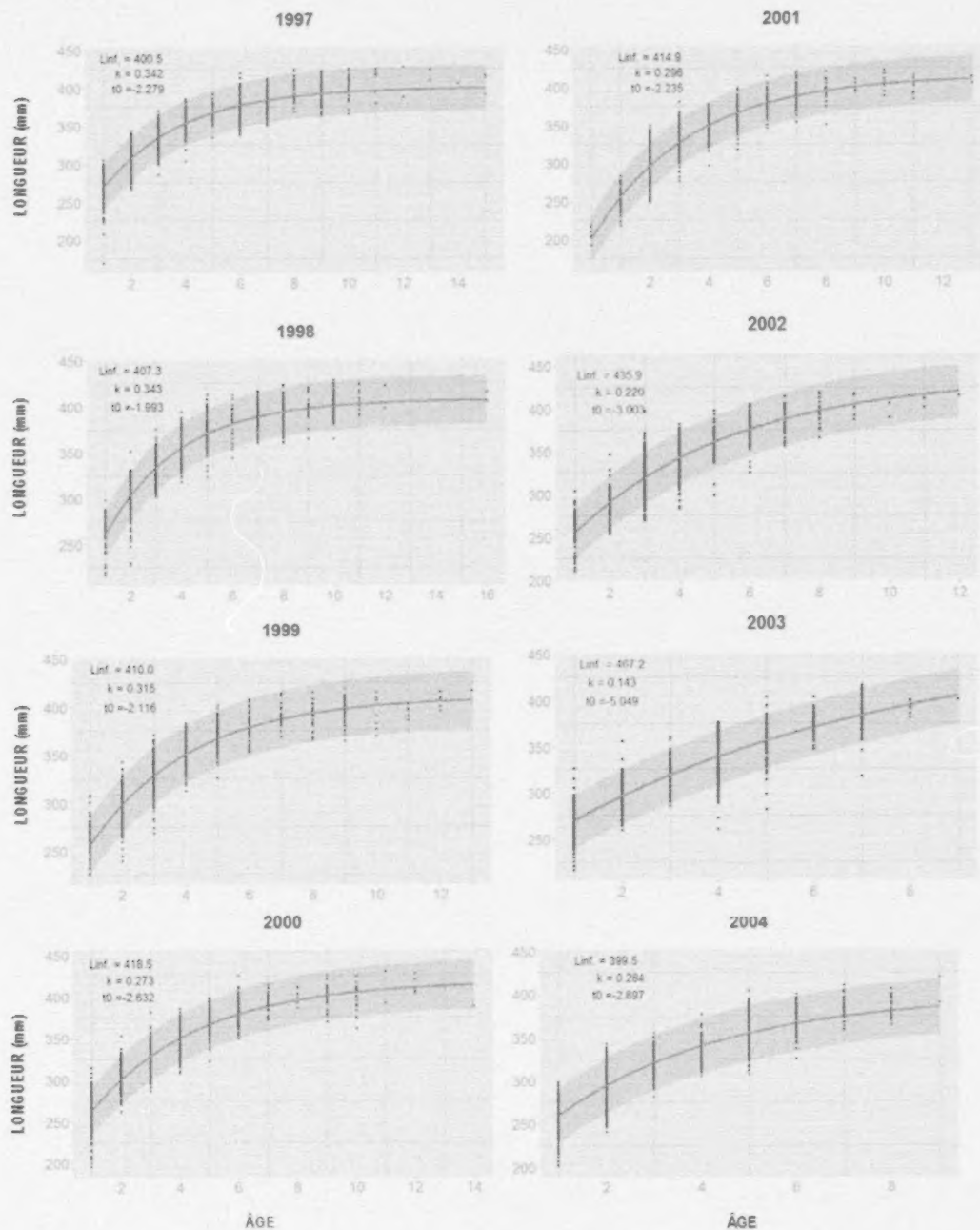


Figure 4. (Suite).

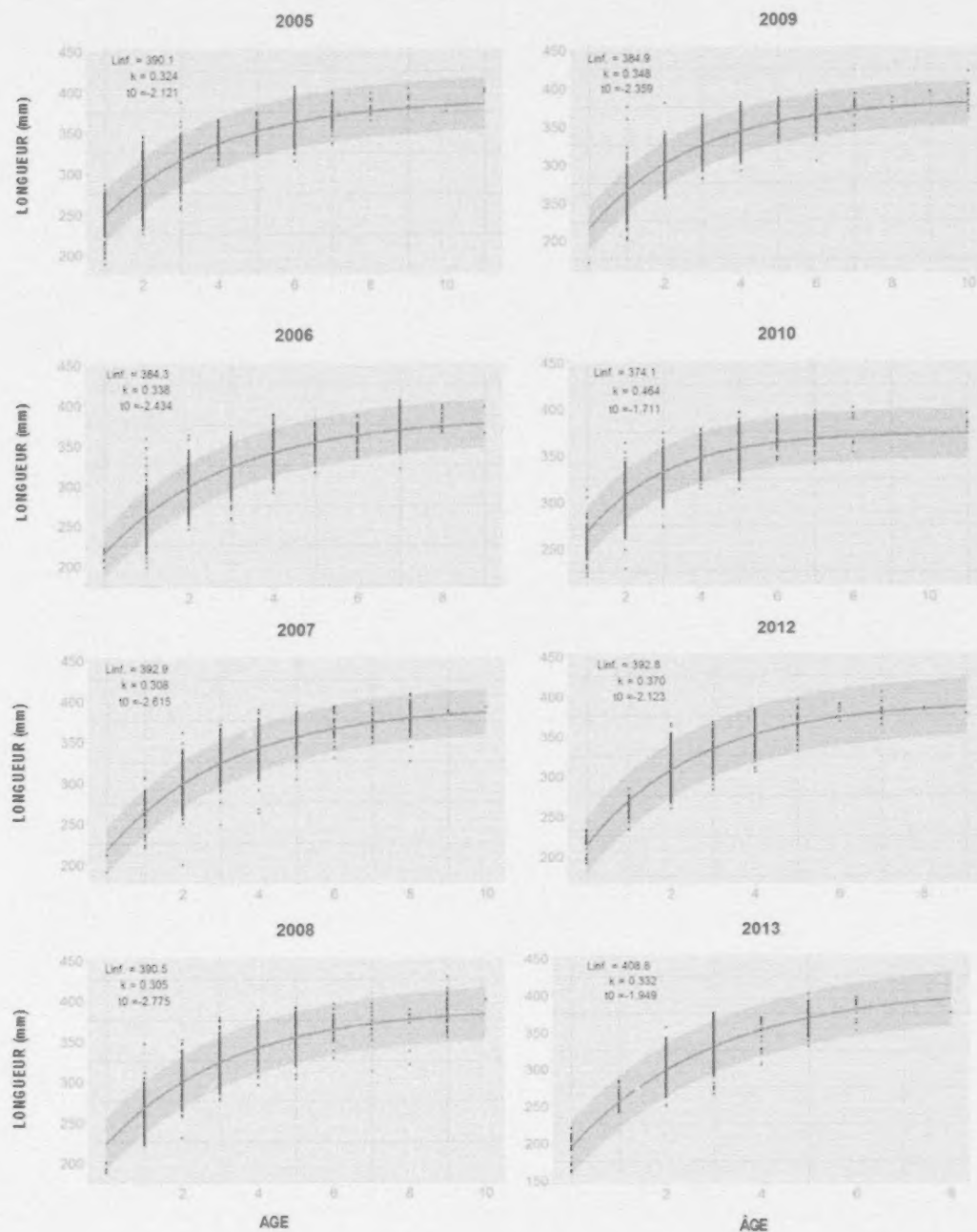


Figure 4. (Suite).

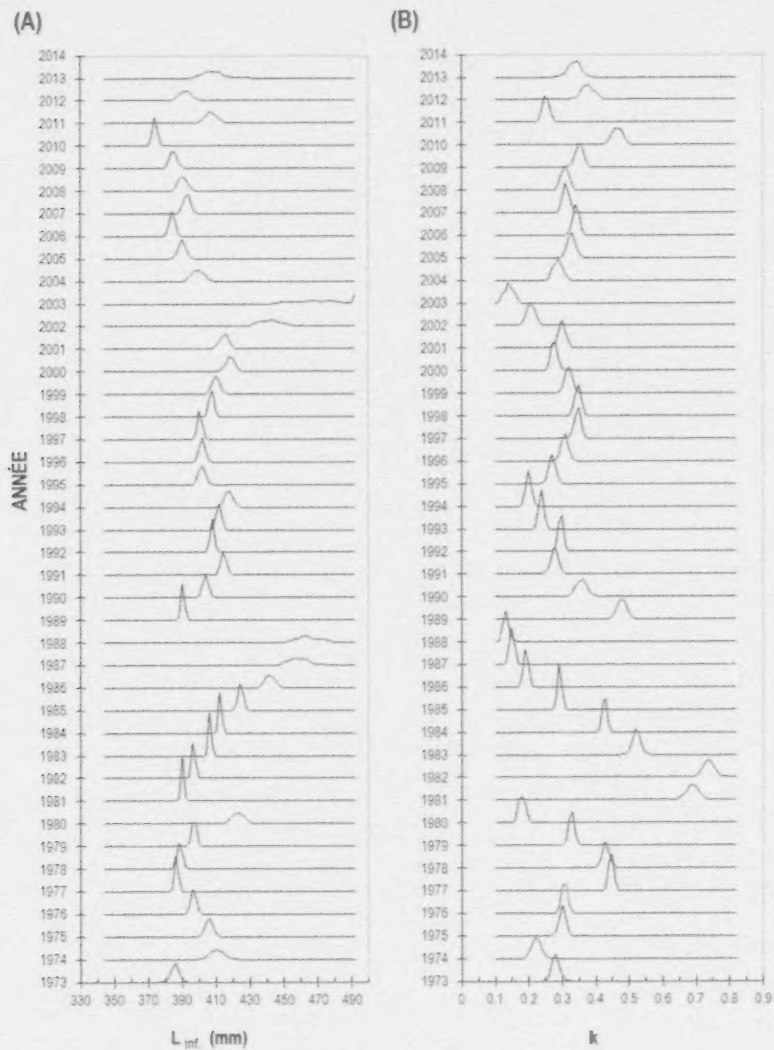


Figure 5. Distributions postérieures annuelles des paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013: (A) L_{inf} , (B) k et (C) t_0 .

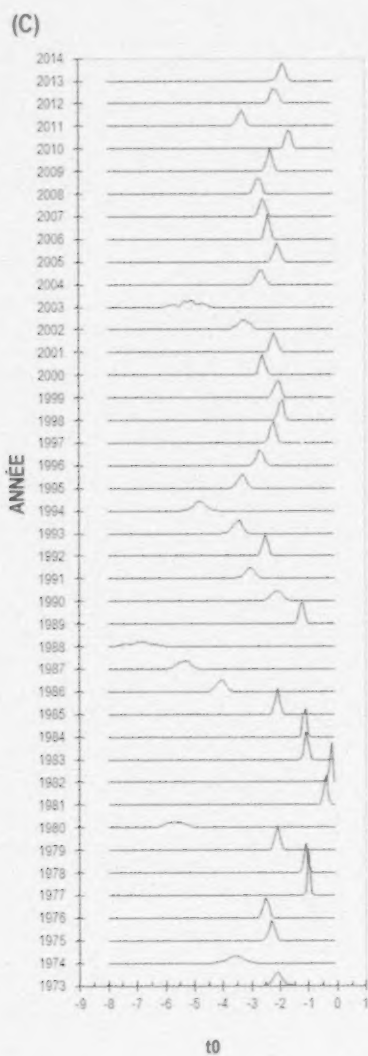


Figure 5. (Suite).

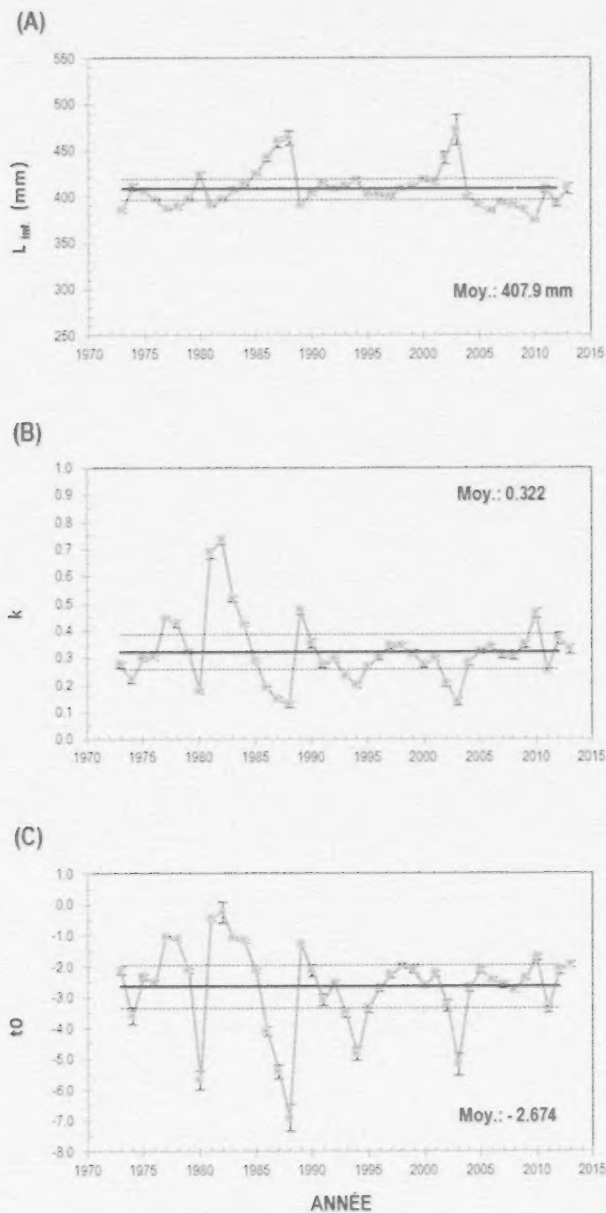


Figure 6. Valeurs moyennes annuelles et intervalles de crédibilité à 95 % des paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada de 1973 à 2013: (A) L_{inf} , (B) k et (C) t_0 . Les lignes horizontales représentent les moyennes $\pm 0.5 \times$ écarts-types de la période 1973 à 2012.

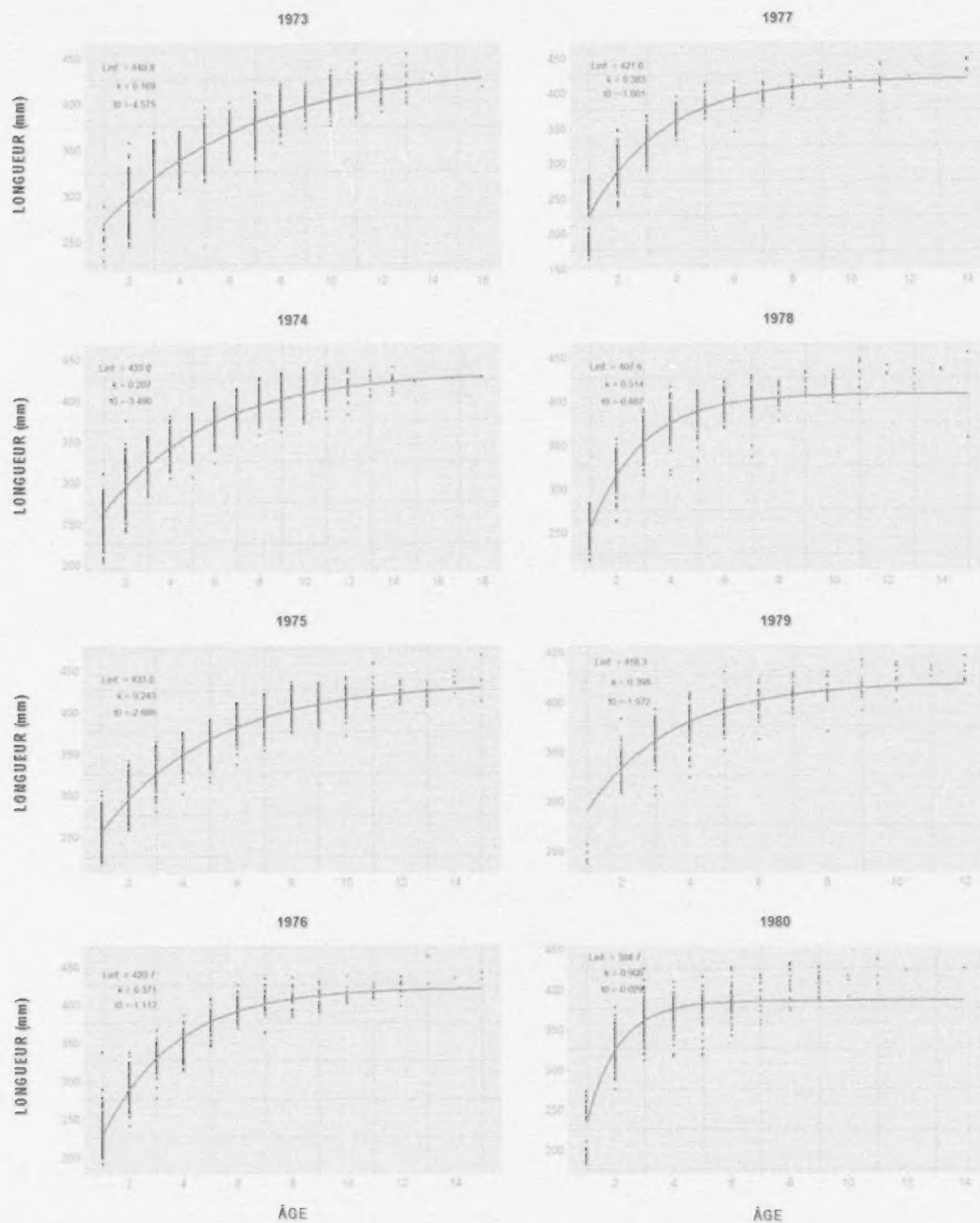


Figure 7. Longueurs (mm) à l'âge observées et prédites par les modèles de croissance de von Bertalanffy et intervalles de prédictibilité à 95 % des cohortes 1973–2005 (avec âge maximal supérieur ou égal à 8 ans) des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

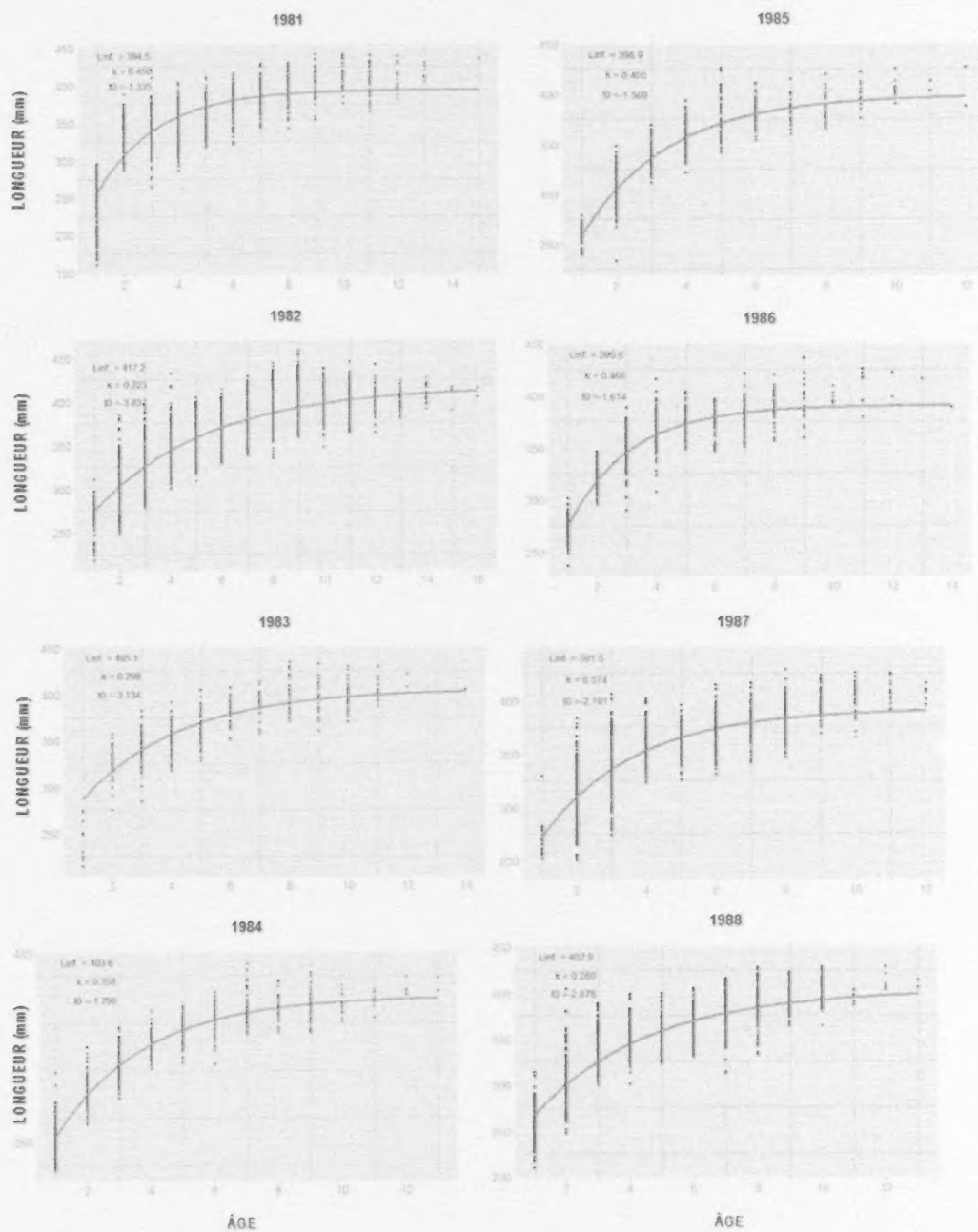


Figure 7. (Suite).

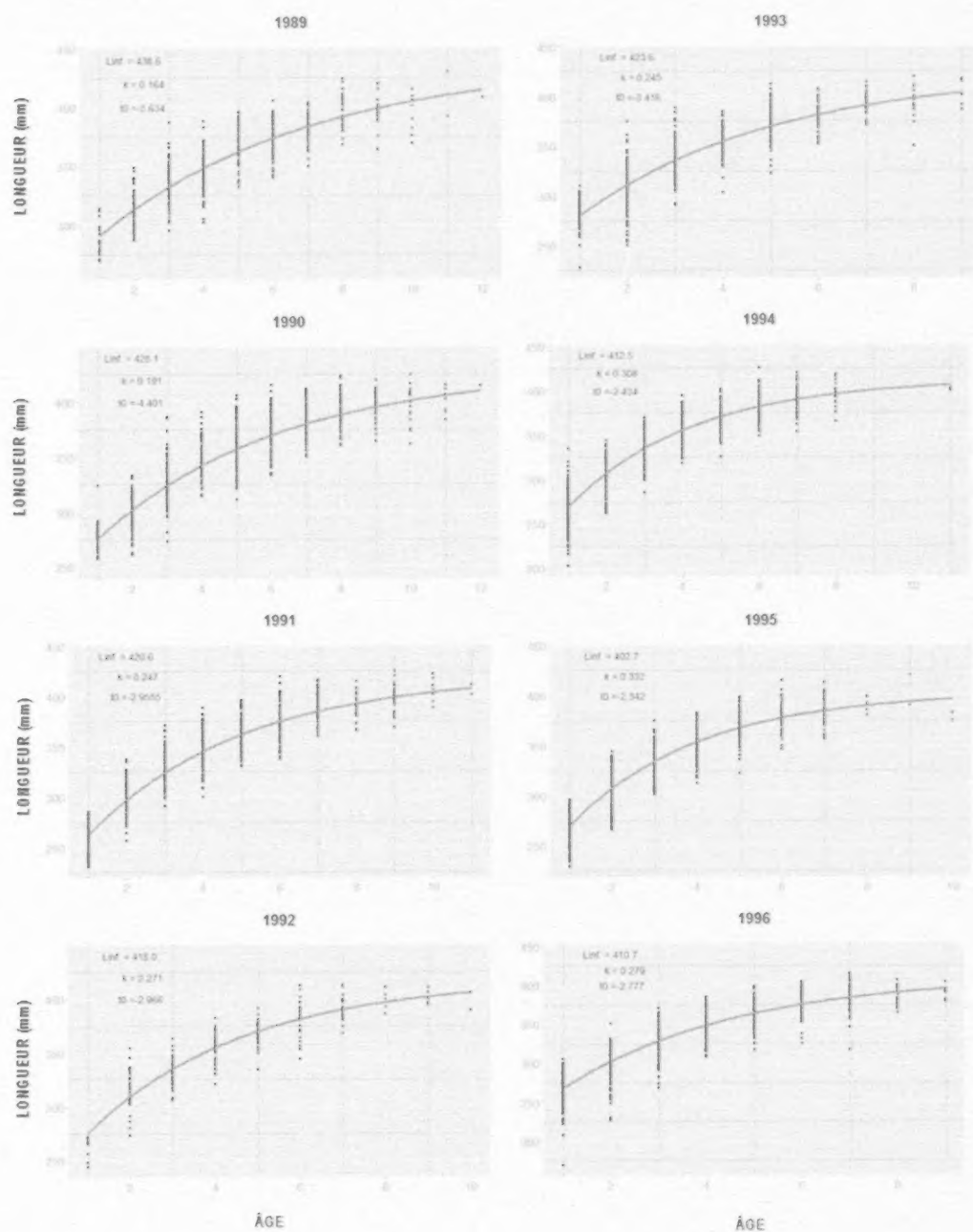


Figure 7. (Suite).

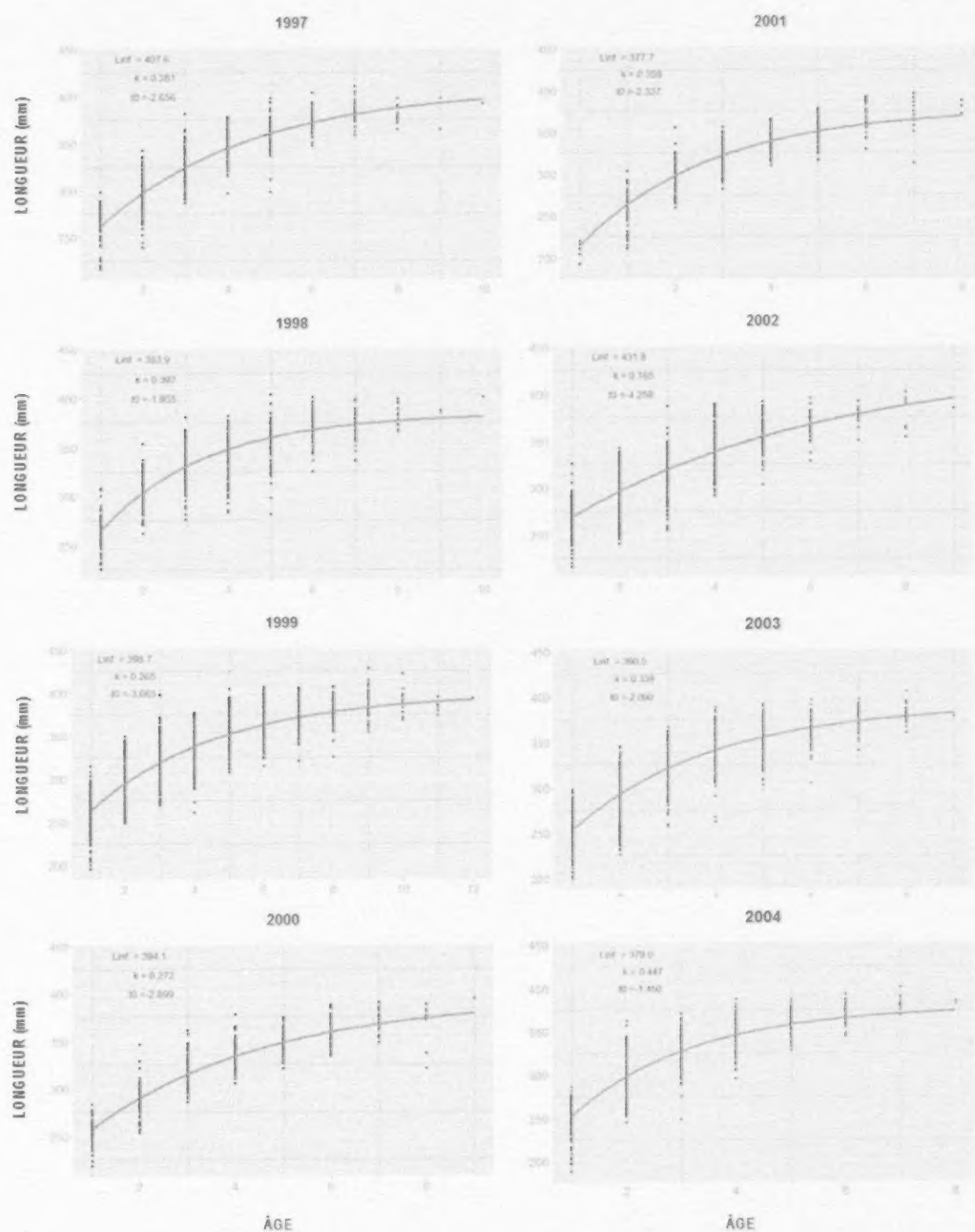


Figure 7. (Suite).

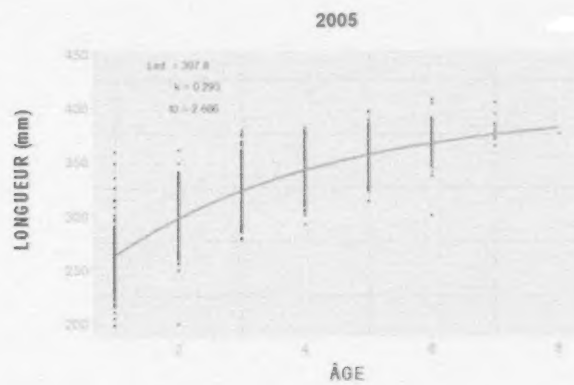


Figure 7 (Suite).

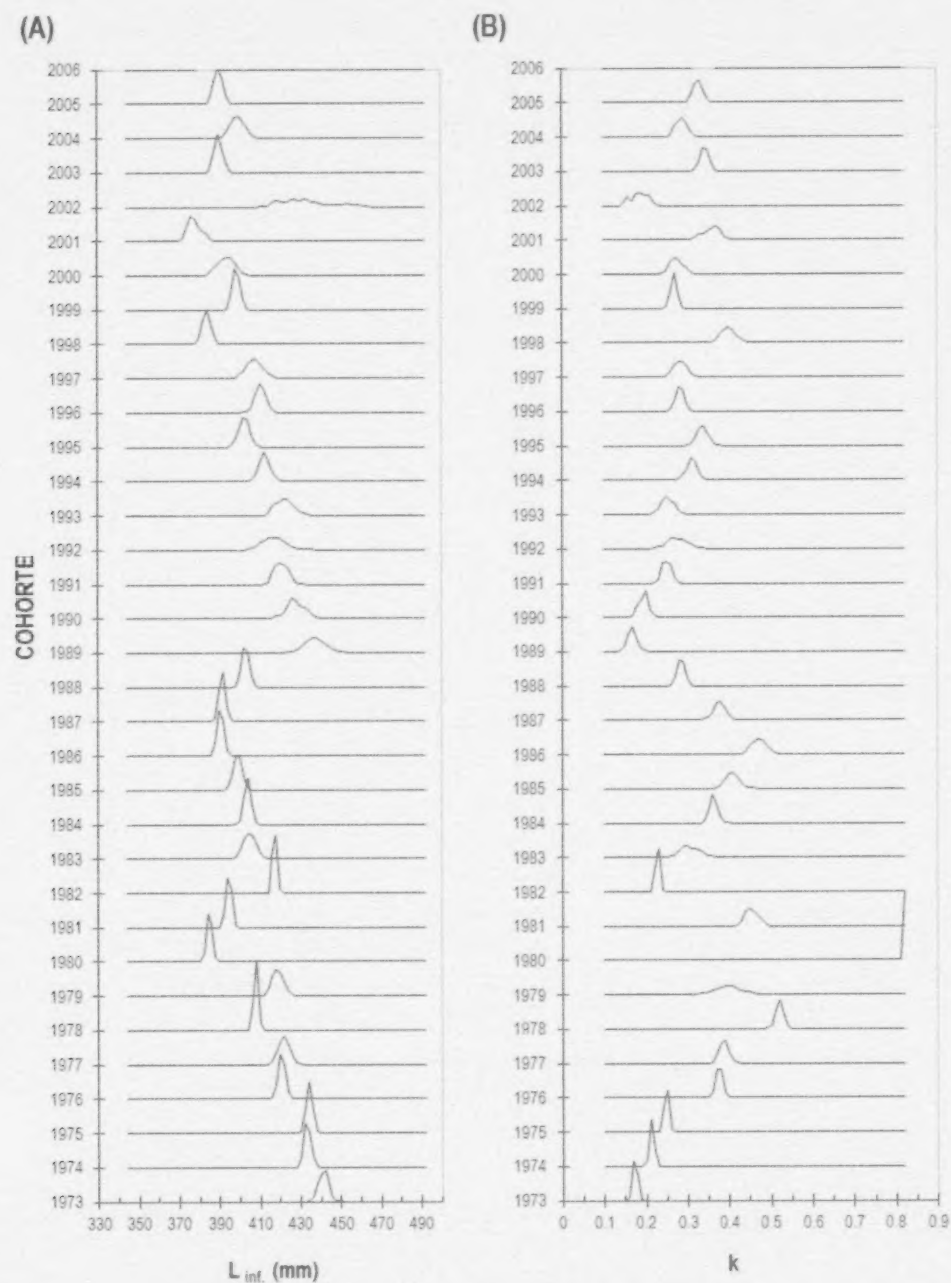


Figure 8. Distributions postérieures annuelles des paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus des cohortes 1973–2005 échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013: (A) L_{inf} , (B) k et (C) t_0 .

(C)

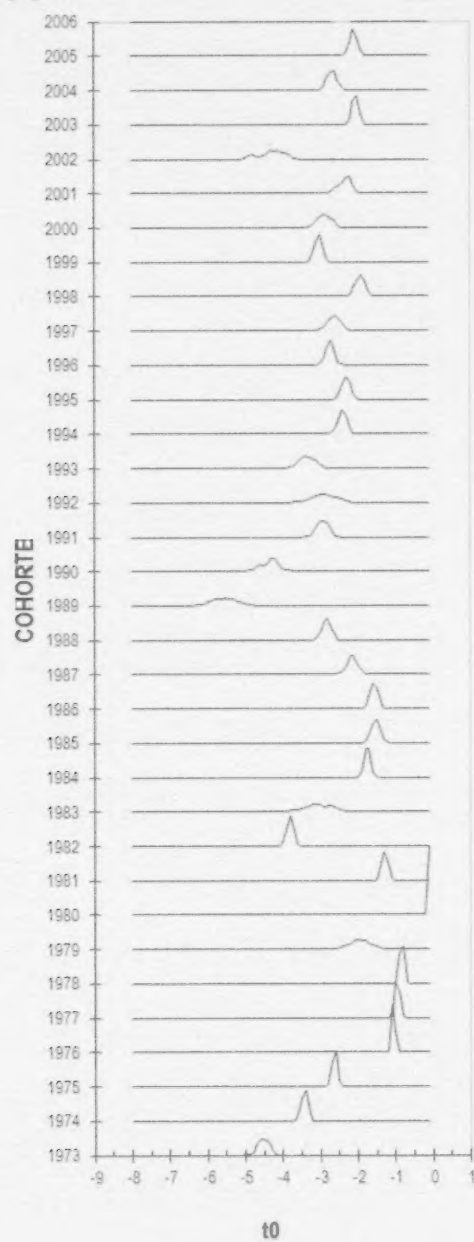


Figure 8. (Suite).

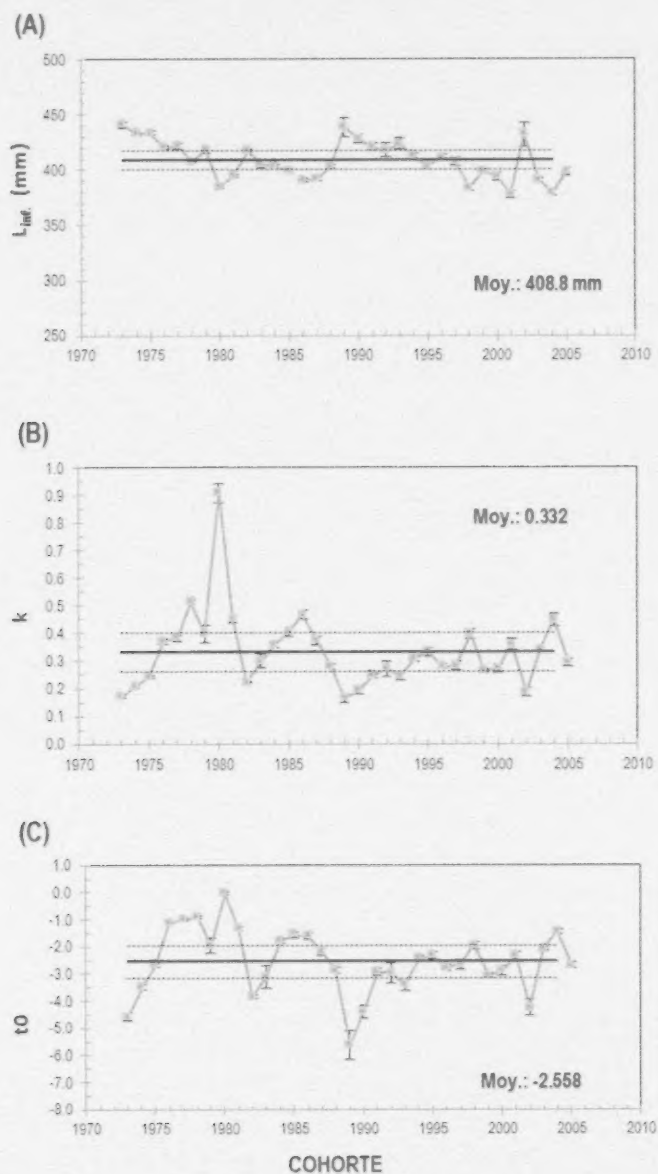


Figure 9. Valeurs moyennes annuelles et intervalles de crédibilité à 95 % des paramètres des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus des cohortes 1973–2005 échantillonnés sur la côte est du Canada de 1973 à 2013: (A) L_{inf} , (B) k et (C) t_0 . Les lignes horizontales représentent les moyennes $\pm 0.5 \times$ écarts-types des cohortes 1973–2004.

ANNEXE

Annexe 1. Code OpenBUGS des modèles de croissance de von Bertalanffy de la longueur (mm) à l'âge des maquereaux bleus échantillonnés sur la côte est du Canada, de 1973 à 2013.

```
modelFilename="vonBertalanffy.txt"

cat("
  model {
    tau<-1/(sigma*sigma)
    sigma~dunif(0,100)

    # Priors
    Linf ~ dunif(0, 1000)
    k ~ dunif(0, 10)
    t0 ~ dunif(-10, 10)

    # Likelihood
    for (i in 1:N) {
      y[i] ~ dnorm(mu[i], tau)
      mu[i] <- Linf * (1-exp(-k * (Age[i] - t0)))
    }
  }

",fill=TRUE,file=modelFilename)

# Paramètres à estimer
params<-c("Linf","k","t0","sigma")

# Regroupement des données
win.data<-list("Age","N","y")

# Initialisation des fonctions
inits<-function()
list(sigma=1,Linf=380,k=0.5,t0=-2)

# Ajustement de MCMC
nc<-3
ni<-10000
```

```
nb<-5000
```

```
nt<-1
```

```
# Démarrer "Gibbs sampler"
```

```
out<-bugs(data=win.data, inits=inits, parameters=params, model=
```

```
"vonBertalanffy.txt", n.thin=nt, n.chains=nc, n.burnin=nb,
```

```
n.iter=ni, debug=TRUE, codaPkg=TRUE, DIC=TRUE, working.directory=getwd())
```